

パワーアシストカートの自律移動制御

Autonomous Transfer Control of Power-Assisted Cart

山下 秀樹* ・ 藤原 茂喜* ・ 宮崎 智太郎* ・ 岡野 正紀*
Hideki Yamashita Shigeki Fujiwara Tomotaro Miyazaki Masanori Okano

病院で使用されているパワーアシスト機能付き配膳車において、デッドレコニングで算出した自己位置を Weiss 法を改良したマップマッチング法により補正することによって、非直交壁面の環境下でも信頼性の高い自己位置認識法を開発した。さらに、レーザレーダや超音波センサなどの併用による障害物検知機能の開発、および運行スケジュールやエレベータを遠隔操作する中央制御システムの開発によって、配膳作業の効率化と省人化を実現した。

In meal delivery systems used in hospitals, a self-position recognition method used for reliably guiding a cart, even under a non-orthogonal wall environment has been developed by correcting the current position calculated with the dead reckoning by using the map-matching method, which is an improvement on Weiss's method. In addition, the development of an obstacle detection function by combining laser-beam radars and ultrasonic sensors, and a centralized control system for operation schedule and remote control of elevators improved the efficiency of meal delivery operations by reducing the required manpower.

1. ま え が き

病院では、入院患者の食事を適温で運搬するために保温保冷庫付き配膳車を使用している（図1）。配膳車（以下、カートと記す）はその質量が最大で700 kgにもなるため電動式が主流である。そこで筆者らは、重量台車の操作力を軽減するために、前後進および旋回 of 2 自由度駆動のパワーアシストカートを開発した¹⁾。また、横や斜めにも軽快に移動できるホロノミックな全方向移動機構機能^{2), 3)}や、壁などへの接触を自動で回避することができる機能も開発した^{4), 5)}。

さらに、人員削減および正確な時間に配膳作業を行うためのカートの自律移動技術を開発している。

ただし、配膳作業の全行程を自律移動させると、人の多いところでは頻繁に安全装置が働いて停止するため移動効率が悪化する問題がある。

そこで、筆者らは、自律移動による無人走行とオペレータによる手動運転を併用するシステムによって、移動効率を低下させずに配膳作業を可能にした。具体的には図2に示すように、まず厨房から自律移動を開始してエレベータに自動搭乗降し、病棟の配膳拠点（ナースステーション近辺が多い）までは無人走行する。次にナースステーション

から各病室前までは、患者や見舞いの外来者が多いので、オペレータによる手動運転とする。このときはパワーアシスト機能が働いているため移動は楽にできる。また、カートは無線 LAN を介し厨房にある PC（以下、中央制御 PC と記す）と通信を行い、その指示に従って移動・停止をする。

フロア間を移動する場合には、中央制御 PC はエレベー



図1 配膳車の外観

* 生産技術研究所 Production Technologies Research Laboratory

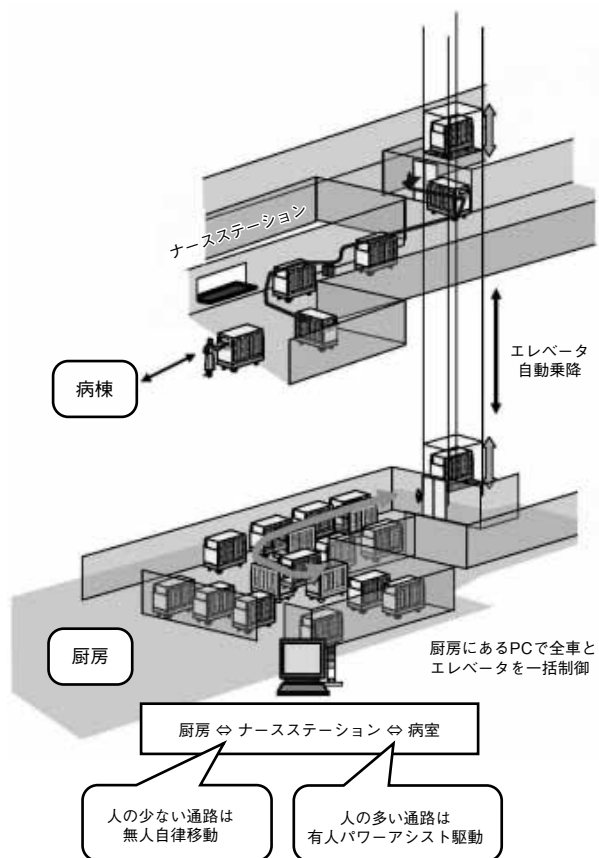


図2 カート移動システム

タを遠隔操作するとともに、各カートへエレベータ搭乗降の指示を出すこともでき、運用面の効率も高めている。

筆者らは、前述のような機能をもつカートを試作し、実環境でのフィールドテストを実施してその有効性を確認している。本稿では、カート本体の自律移動機能のうち、障害物検知機能、自己位置認識機能、搬送システムについて述べる。

2. カートの構成

図3にカートのセンサ配置図を、また、図4に障害物検知用のレーザレーダの配置と検知範囲の模式図を示す。

人の通行する場所において大型で長方形のカート（幅0.8 m×長さ1.6～2.3 m×高さ1.6 m）を運用するには、安全のため多くの距離センサが必要である。検出範囲が数mレベルの非接触距離センサとしては、光学式と超音波式があるが、前者は鏡やガラスなどは検知できない。また、後者は吸音効果の大きい布などの材料は検出困難である。したがって、これらの欠点を補い合うように、7個のレーザレーダと8個の超音波センサを併用し、病院内で想定される障害物（点滴棒、ベッド、椅子、手すりなど）を検知可能な構成にしている。なお、7個のレーザレーダは検知角240°のものを使用している。

3個の水平に配置したレーザレーダ（以下、水平レーダ

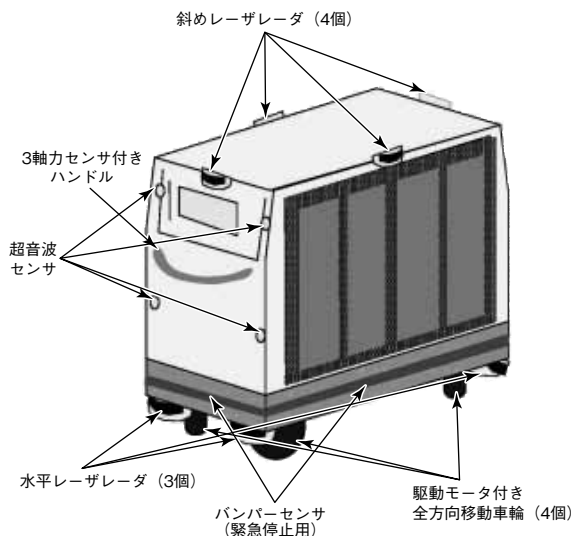


図3 カートのセンサ配置図

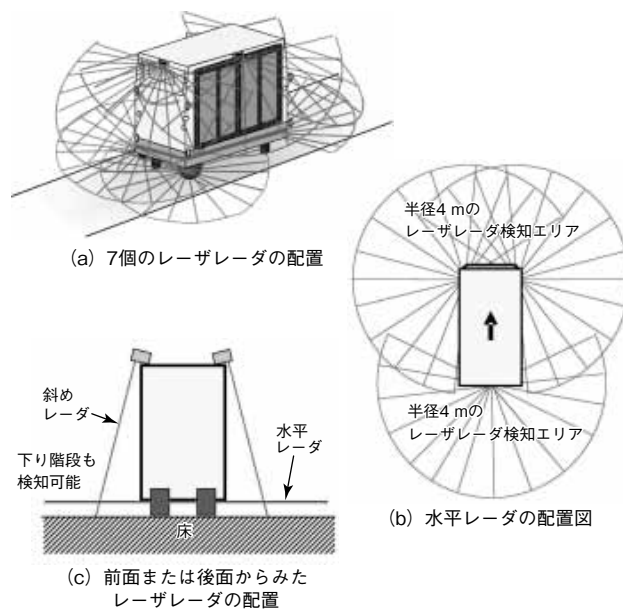


図4 レーザレーダの配置と検知範囲

と記す) によるカートの周囲検知により、自己位置推定と障害物の回避を行い、前後および両側面の上方に配置した斜め下向きのレーザレーダ（以下、斜めレーダと記す）によって、空中突出物（脚の離れたベットや長椅子など）の検知を行っている。

図5に制御フローを示す。自律移動制御に必要な機能は、自己位置認識機能と、移動制御機能に大別される。移動制御では、レーザレーダおよび超音波センサの障害物情報をもとに回避・停止判定を行う。

3. 自己位置認識機能

カートを自律移動させるうえでもっとも重要な機能は、自車の位置を確実に認識すること（以下、自己位置認識と

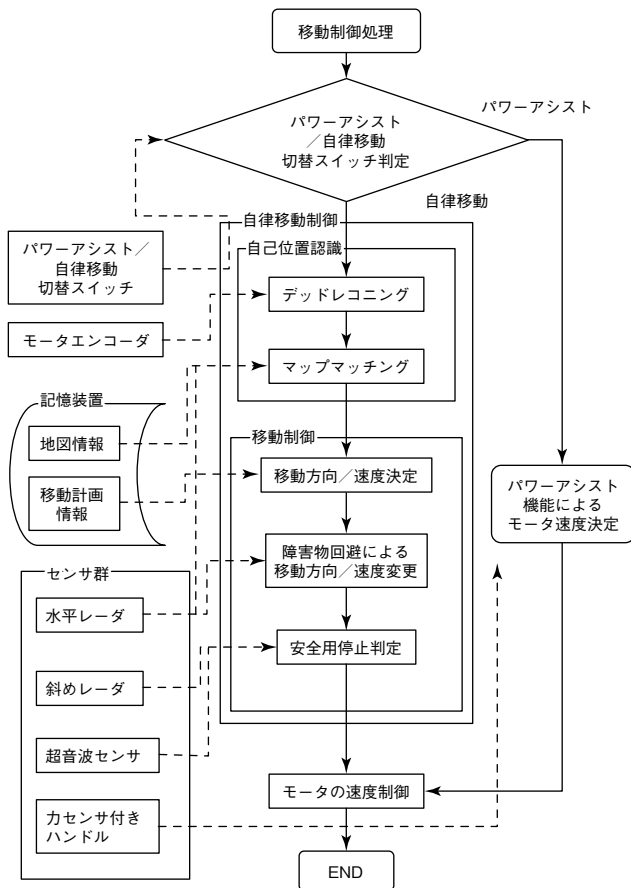


図5 カート制御フロー

記す)である。屋内で使用される自己位置認識方法として、車輪の移動量の累積で推定する方法(以下、デッドレコニング法と記す)や、入力済みの地図情報と車両周辺の障害物位置情報との比較から求める方法(以下、マップマッチング法と記す)などがある。

デッドレコニング法は、駆動輪のモータに取り付けられたエンコーダ情報から自己位置を求める。しかし、累積誤差が大きくなる問題がある。一方、マップマッチング法は、水平レーダの障害物情報を用いるが、地図情報に含まれない障害物(人や荷物など)が多い環境では、現在位置を特定できないという問題がある。そこで、本システムではデッドレコニングで常時自己位置を算出し、その補正をマップマッチングで行う併用方式を採用している。

次に本システムのデッドレコニング法、およびマップマッチング法について説明する。

3.1 デッドレコニング法

まず、エンコード情報からカート座標を求める方法について説明する。エンコード値より算出されたカート速度(v_{xn} , v_{yn} , ω_n)を用いて、制御周期 ΔT 当りのカートの走行路面に対する微小移動量(Δx , Δy , $\Delta \theta$)は次式のように表される。

$$\begin{aligned}\Delta x &= v_{xn} \cdot \Delta T \cdot \cos\left(\frac{\Delta \theta}{2}\right) - v_{yn} \cdot \Delta T \cdot \sin\left(\frac{\Delta \theta}{2}\right) \\ \Delta y &= v_{xn} \cdot \Delta T \cdot \sin\left(\frac{\Delta \theta}{2}\right) + v_{yn} \cdot \Delta T \cdot \cos\left(\frac{\Delta \theta}{2}\right) \\ \Delta \theta &= \omega_n \cdot \Delta T\end{aligned}\quad (1)$$

式(1)と一つ前の制御周期時のカート中心座標($x(n-1)$, $y(n-1)$, $\theta(n-1)$)を用いて、現在のカート中心座標($x(n)$, $y(n)$, $\theta(n)$)は次式で表すことができる。

$$\begin{bmatrix} x(n) \\ y(n) \\ \theta(n) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x(n-1) + \Delta x \\ y(n-1) + \Delta y \\ \theta(n-1) + \Delta \theta \end{bmatrix}\quad (2)$$

3.2 マップマッチング法

本システムでは、マップマッチング法としてWeissのマッチング法(以下、Weiss法と記す)を利用する^{6), 7)}。これには、次のような特徴がある。

- (1) 地図情報に含まれない障害物(人や荷物など)が存在することがある複雑な環境にも対応可能。
- (2) 最小2乗法を用いた線分マッチングよりも演算量が少なくCPUへの負荷が小さい。

しかし、従来使われているヒストグラムを用いたWeiss法では、マップマッチングを行う際、壁が直交することを前提に行っている。ところが、実際にカートなどが使用される環境では、直交しない壁も存在する。そこで、直交しない壁に対しても、2次元座標(x , y)の補正ができる方法を考案した。その手順について以下に述べる。

マップマッチングする前の認識位置にカートが存在した場合は、マップマッチングに利用する水平レーダ位置と地図データから生成した擬似障害物データ(以下、GM_Scanと記す)と水平レーダから実際に得られる障害物データ(以下、Current_Scanと記す)との回転方向差 $\Delta \theta$ 、および障害物情報をもっとも多い角度(以下、最多存在角と記す) θ_1 , θ_2 を求める。

- (3) $\Delta \theta$, θ_1 , θ_2 を用いて二つのScanの角度を調整する。
- (4) 姿勢をそろえた両Scanの並進方向の差(Δx , Δy)を求める。

3.2.1 $\Delta \theta$, θ_1 , θ_2 の計算

- (1) GM_Scanを補正前の自己位置と地図情報から求める。
- (2) Current_ScanとGM_Scanから隣り合う2点を結ぶ直線の傾き θ のヒストグラム(以下、angle-histogramと記す)をそれぞれ作成する。

GM_Scanのangle-histogramを $h_1(i)$

Current_Scanのangle-histogramを $h_2(i)$

(3) 二つの angle-histogram, $h_1(i)$, $h_2(i)$ の相関値を求める関数を

$$k(j) = \sum_i h_1(i) h_2(i+j) \quad (3)$$

とすると、関数 $k(j)$ が最大値をとる角度 $\Delta d \cdot j$ (Δd は、ヒストグラムの区間幅) が二つの Scan の回転方向の差 $\Delta\theta$ として求まる。

(4) GM_Scan の angle-histogram の最大区間と 2 番目に大きい区間を求め、その角度を θ_1 , θ_2 とする。

3.2.2 両 Scan の角度調整

GM_Scan を $\pi/2 - \theta_1$, Current_Scan を $\pi/2 - \theta_1 - \Delta\theta$ それぞれ回転させ、できるだけ多くの点が y 軸に平行になるようにする。このときできたスキャンデータを GM_Scan1, Current_Scan1 とする (図6 参照)。

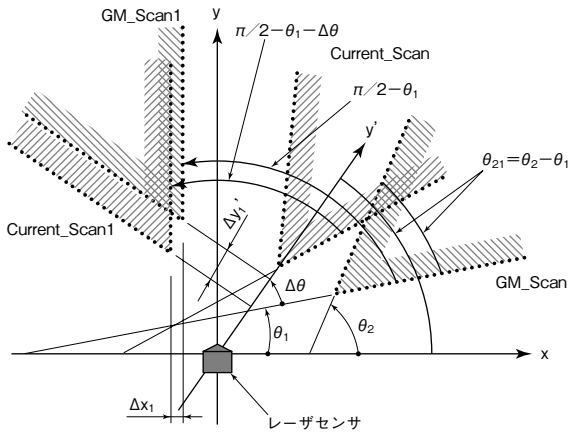


図6 マップマッチング

3.2.3 並進方向の差の計算

- (1) GM_Scan1, Current_Scan1 について、 x 方向の x ヒストグラムを作成し、それらのヒストグラムの相関が最大になる Δx_1 を求める。
- (2) GM_Scan1, Current_Scan1 について、 x 軸に対し θ_{21} ($= \theta_2 - \theta_1$) 傾いた軸 y' 方向の y' ヒストグラムを作成し、それらのヒストグラムの相関が最大になる $\Delta y_1'$ を求める。
- (3) (Δx_1 , $\Delta y_1'$) は元の Scan を $\pi/2 - \theta_1$ 回転させた後の x と y' 軸方向 (y' 軸は、 x 軸に対し θ_{21} 傾いた軸) における並進差である。 y 軸方向の並進差 Δy_1 は、以下の式で得られる (図6 および図6 の拡大図である図7 参照)。

$$\Delta y_1 = \frac{\Delta y_1' - \Delta x_1 \cdot \cos \theta_{21}}{\sin \theta_{21}} \quad (4)$$

回転前の並進方向の差 (Δx , Δy) は、以下の式で得られる。

$$\Delta x = \Delta x_1 \cdot \cos \theta_1 - \Delta y_1 \cdot \sin \theta_1 \quad (5)$$

$$\Delta y = \Delta x_1 \cdot \sin \theta_1 + \Delta y_1 \cdot \cos \theta_1 \quad (6)$$

前述のマップマッチングにより、直交しない壁情報でも 2 次元の自己位置認識が可能となる。

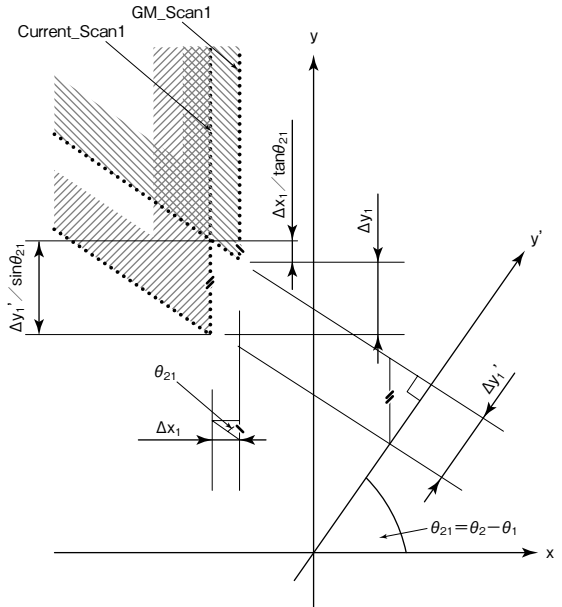


図7 回転後 Scan の並進差

3.3 マップマッチングの検証

次に、マップマッチングを実環境で検証する。

実験は y 字の交差点を想定して行う (図8 参照)。

従来の Weiss 法では、直交する壁情報がないため、 xy 方向のマップマッチングを行えない環境条件である。また



図8 マップマッチングの実験の様子

マップマッチング補正前後(初期状態として角度 3° , xy方向にそれぞれ100 mmの位置ずれを与えた)のGM_Scan, Current_Scan, xy'ヒストグラム, 相関値を図9, 図10に示す。これらは, リアルタイムでの演算結果である。

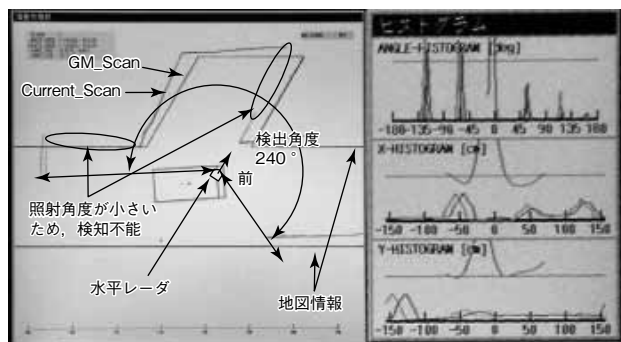


図9 マップマッチング前のScanデータなど

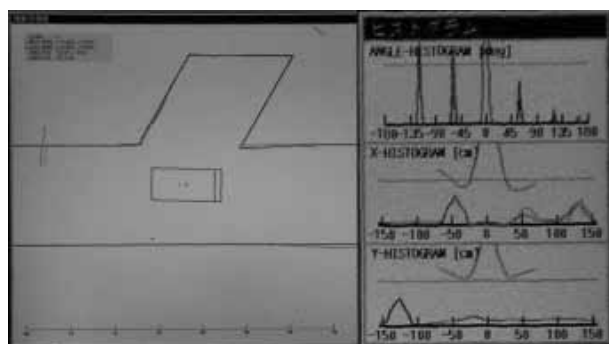


図10 マップマッチング後のScanデータなど

図9は, マップマッチング前の状態で, 地図情報と水平レーダで検出した障害物情報が離れているが, 図10では, 水平レーダで検出した障害物情報と地図情報がほぼ一致していることがわかる。したがって, 直交しない壁情報から, 2次元のマップマッチングを行えることを検証できる。

今回の実験では, 形状に変化がある壁に向いている水平レーダ(3個のうちの1個)を用いたため, 2次元のマップマッチングが可能である。しかし, ほかの水平レーダでマップマッチングを行う場合, 向きとカートの前後方向しか補正できないこともある。ところが, 実際は, 3個のレーザレーダを順次切り替えてマップマッチングを行うことにより, カート全方向からの位置情報を得ている。このため, 一つの水平レーダの間近に障害物があっても, ほかの水平レーダでマップマッチングが可能となっている。

4. 障害物検知機能

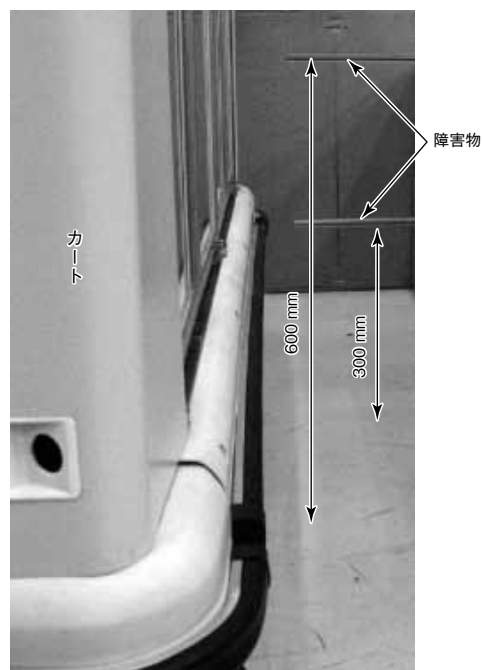
4.1 レーザレーダによる障害物検知

水平レーダは, 障害物の回避以外に近距離の障害物を検知する。一方, 斜めレーダは常時床面を検知し, 床面が検知できないときは, 障害物または下り階段と判断してその方向への進行を停止させる。

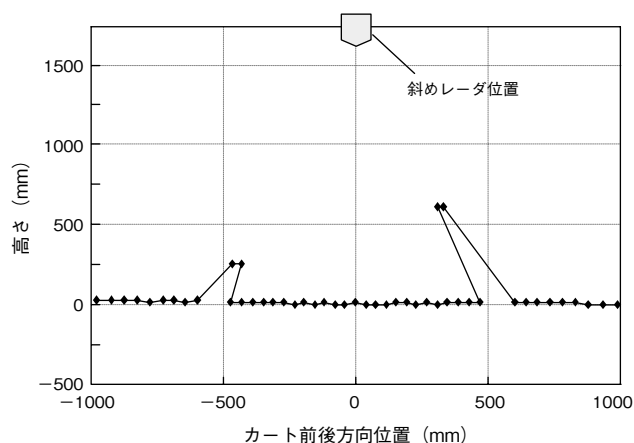
4.2 斜めレーザレーダによる障害物検知の検証

異なる高さに2種類の障害物(空中突出物)を設置し, 斜めレーダで検知させる実験を行った。図11(a)に障害物の設置状態と, 図11(b)には, 斜めレーダから得られる障害物情報を床面からの高さに換算した数値を示す。

このような実験を繰り返した結果, 高さの異なる障害物や床面を誤差30 mm以内で計測できることを確認している。以上のことから, 斜めレーダの空中突出物検出の有効性が確認できる。



(a) 実験時の障害物



(b) 床面からの高さに変換後のデータ

図11 斜めレーダの障害物情報

4.3 その他の検知センサ

レーザレーダのような光学系センサで検出できない障害物(ガラス・鏡など)は, 超音波センサにて検出する。超音波センサは, 前後面の上下左右に1個ずつ計4個, 前後で8個配置している。

図12に示すように本カートの進行方向の障害物検知用に非接触センサとして、水平レーダ、斜めレーダ、そして超音波センサを備える。さらに、万一これらの検知をすり抜けた場合のための接触検知センサである力センサハンドルおよびバンパセンサを含め計5種類備えているため、障害物検知機能は十分と考えられる。

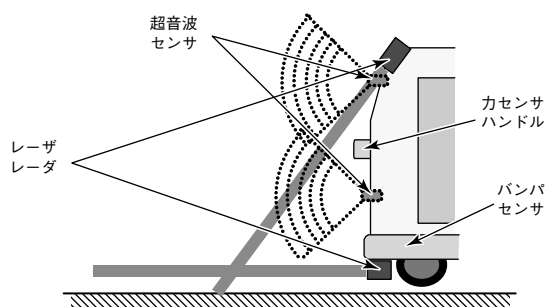


図12 前面非接触3重安全

5. 搬送システム

本カートを使用して、病院内の厨房と病棟の間を移動させるためには、専用の搬送システムが別途必要になる。この搬送システムには、適切なタイミングでカートに移動指示・停止指示を与える搬送進捗管理機能と、フロア間の移動を効率的に行うエレベータ乗降制御機能が必須である。次に搬送システムの構成と主な機能について説明する。

5.1 システム構成

図13に本カートを複数台で使用する搬送システムの構成を示す。

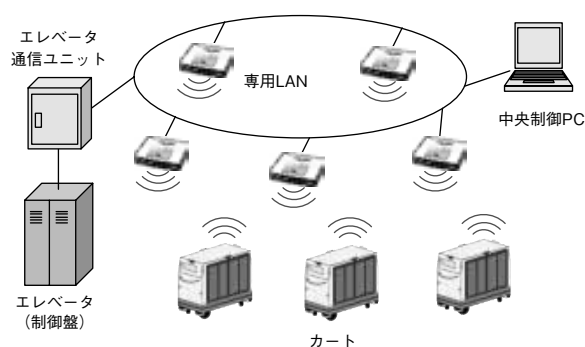


図13 搬送システム構成

中央制御PCは複数カートの搬送管理とエレベータの遠隔操作を行う。中央制御PCはカート搬送専用のLANに接続されており、無線アクセスポイントを介してカートに指示を与えることができる。また、エレベータ制御盤にはLAN通信機能を有するエレベータ通信ユニットが接続され、外部機器からエレベータの遠隔操作を可能にしている。

5.2 複数台制御

5.2.1 搬送進捗管理

中央制御PCはスケジュールに基づいて各カートに移動指示を与える。搬送中は、各カートの現在位置、行先地、走行状況、出発時刻、到着時刻や各駐車場の状況などをリアルタイムで監視する。

また、搬送業務に影響する異常や故障が発生した場合は、ブザー鳴動とともに監視PC画面に異常内容を表示する。

5.2.2 車間距離の監視

複数台のカートを制御するときに問題になるのが、カート同士による渋滞である。渋滞が発生すると、後続のカートが前方のカートを障害物と認識し、障害物回避機能の働きで追越し動作に入る。このとき狭い廊下などでは無理な追越しが発生し、その結果身動きが取れない状態に陥る。これを防止するために、中央制御PCは自律移動しているカート同士の車間距離を監視している。車間距離が狭まると後続カートを一時的に停止させ、車間距離が開けば走行を再開させる。この車間距離は実際の走行ルートをベースに計算している。

5.3 エレベータ乗降制御

エレベータでカートを搬送する場合は、エレベータを遠隔操作専用の運転モード（以下、専用運転と記す）に切り替えて人との乗合せを防止している。次に中央制御PCの指示に従いエレベータがカートを運ぶ手順を簡単に説明する。

中央制御PCは、カートがエレベータホールに到着すると、エレベータをそのフロアまで移動させる。エレベータが到着して扉が開くと、そのまま扉を開いた状態で保持させる。次にカートがエレベータ内まで移動すると、エレベータに行先階を登録して扉を閉じる。エレベータは扉が閉じると自動的に行先階まで昇降する。エレベータが行先階に到着して扉が開くと、再び扉を開いた状態で保持させ、カートをエレベータ内からエレベータホールまで移動させる。カートがエレベータから降りたタイミングで専用運転を解除し、エレベータを通常運転モードに戻す。

6. あとがき

病院で使用されているパワーアシスト機能付き配膳車において、デッドレコニングで算出した自己位置をWeiss法を改良したマップマッチング法により補正することによって、非直交壁面の環境下でも信頼性の高い自己位置認識法を開発した。さらに、斜めレーザレーダや超音波センサなどの併用による障害物検知機能の開発、および運行スケジュールやエレベータを遠隔操作する中央制御システムの開発によって、配膳作業の効率化と省人化を実現した。

今後は、病院での運用評価を行い、よりユーザが使いやすいシステムに仕上げたい。

また、このシステムは、工場内の生産現場の重量搬送台車などにも応用が広がると考えている。

*参考文献

- 1) 藤原 茂喜, 山下 秀樹, 前田 裕史: パワーアシスト制御技術, 松下電工技報, No. 55, p. 87-93 (1996)
- 2) S. Fujiwara, H. Kitano, H. Yamashita, H. Maeda, H. Fukunaga: Omni-directional Cart with Power Assist System, Journal of Robotics and Mechatronics, Vol. 14, No. 4, p. 333-341 (2002)
- 3) 藤原 茂喜, 北野 斉, 山下 秀樹, 前田 裕史, 福永 秀雄: 全方向移動型パワーアシストカートの操作性向上, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 2, p. 75-81 (2004)
- 4) 山下 秀樹, 藤原 茂喜, 前田 裕史, 岡野 正紀: 壁衝突回避機能付きパワーアシストカートの開発[2], 日本ロボット学会創立20周年記念学術講演会講演概要集, p. 54 (2002)
- 5) 藤原 茂喜, 山下 秀樹, 前田 裕史, 岡野 正紀: 全方向移動型パワーアシストカートの衝突回避機能, 日本ロボット学会誌, Vol. 22, No. 3, p. 105-111 (2004)
- 6) G. WEISS, E. v. PUTTKAMER: A map Based on laserscans without geometric interpretation, Intelligent Autonomous Systems, 4, p. 403-407 (1995)
- 7) 後藤 健志: レーザレンジファインダを用いた電動車椅子の操縦補助システム, 奈良先端科学技術大学院大学 情報科学研究科 情報システム学専攻 修士論文, NAIST-IS-MT0051038 (2002)

◆執筆者紹介



山下 秀樹
生産技術研究所



藤原 茂喜
生産技術研究所
工学博士
技術士(機械部門)



宮崎 智太郎
生産技術研究所



岡野 正紀
生産技術研究所