研 究

高齢者のための光マーカ誘導による施設内自立走行システム

An Indoor Autonomous Mobile System Guided by Light Markers to Assist Elderly People

鈴木 真(正会員), 岡本和年(学生会員), 土肥健純(正会員), 矢野英雄(正会員)*

Makoto SUZUKI, Kazutoshi OKAMOTO, Takeyoshi DIHI, Hideo YANO*

東京大学工学部, *国立身体障害者リハビリテーションセンター研究所

Faculty of Engineering, the University of Tokyo

*Research Institute of the National Rehabilitation Center for the Disabled

Keywords

Navigation, Mobile, Institutional Care, Aged Society,
Rehabilitation Engineering

Abstract

To assist elderly people with physical disability, an autonomous mobile system has been needed. We have been studying the method to navigate such a mobile for institutional care.

Installation of this autonomous mobile has to be easy. Therefore we use light markers to guide the mobile. The markers are fixed to the ceiling at certain intervals. A powered wheelchair is driven according to the position of markers taken by a CCD camera with a wide angle lens. The field of view of the camera is divided using mirrors to get images in multiple directions concurrently.

Since our system will be used in the institutes for elderly people, we assume that the environment is structured. From this assumption, all expected obstacles are walking persons around the mobile. To detect persons on the way, ultrasonic range finders are equipped to the front of the mobile. A prototype software to control the wheelchair was developed. Evaluation in an experimental configuration showed that our system can improve the quality of life (QOL) of elderly people, as well as decrease the burden of carers.

1. はじめに

社会の急速な高齢化を迎え¹⁾, 高齢者の在宅における自立促進と施設における介護作業の効率の向上は緊急の課題となっている。施設においては十分な介護労働力の供給は今後とも期待できず, 様々な用具・機器の導入は必要不可欠

である。即ち, 身体的な疲労が大きく時間的にも負担の大きい作業から介護者を解放し, 最も重要な作業(高齢者の精神的ケアなど)に集中させることを可能にする支援機器が要求されている。

こうした支援機器の対象となる日常生活動作の中で屋内移動は重要な項目である。移動は食事や入浴などその他の日常生活動作の基本であり, 人間が生活していく上で必須の動作である²⁾。高齢者は多くの場合歩行機能の低下を伴ってお

〒113 東京都文京区本郷7-3-1

* 〒359 埼玉県所沢市並木4-1

7-3-1, Hongo, Bunkyo-ku, Tokyo 113

* 4-1, Namiki, Tokorozawa-City, Saitama 359

り、特に特別養護老人ホームなどの施設では重度の歩行障害高齢者がいるため移動介助が必要である。現状では、居室と食堂・浴室の間の移動介助はストレッチャーや手押し車椅子を用いて介護者の人力で行っている。この作業は介護者にとって身体的に負担であるのみならず、高齢者一人の移動に介護者一人を必要とするため時間的にも負担となっている。

この問題に対し、施設内における自立走行システムの導入は極めて有効な解決手段である。目的地まで自動的に障害物に対処しつつ走行するシステムは、高齢者の自立意欲を満たしQOL (Quality of Life)の向上に貢献する。また介護者に関しても身体的負担を除くだけでなく、数人の高齢者の移動を傍についた介護者一人だけで同時に監視できるため時間的負担の軽減にも有効である。

本論文では、施設において利用される自立走行システムについて設計上の要点の明示化とこれに基づく制御方法の選定、試作システムによる評価実験と実用化のための改良点・課題について述べる。

2. 高齢者施設における自立走行システム

従来より自立走行システムについて様々な研究が行われているが、医療・福祉分野への応用としては、Madaraszらによる障害者用自立走行電動車いすの研究³⁾、木村らによる病院内自走ロボットの開発⁴⁾がある。Madaraszらの研究では、身体障害者の行動範囲拡大のため電動車いすに超音波距離計とCCDカメラを搭載し、オフィスの廊下を障害物や通行者を避けて走行するシステムを試作した。試験走行結果から、障害者によっては完全自立走行は望ましくなく、走行操作支援にとどめたほうがよいことを述べている。木村らは病院職員の作業省力化を目的に、床面テープにより検査部受付と検査室を往復し患者誘導と検体・カルテ運搬を行う自走ロボットを開発し、単純な機能でも実用的には十分であることを示した。

これらの研究から、医療・福祉分野における自立走行システムが工場内の搬走システムと異

なる点として、1) 歩行者など周囲の人間との共存、2) 専門の技術者ではなく看護婦などが使うための操作・維持の容易さ、3) 変動する周囲状況や、搭乗者の意思の変化に柔軟に対応して走行できること、が要求されていることが明らかにされた。高齢者施設内の自立走行システムにおいても、これらの要点を考慮して設計開発を行う必要がある。

3. 自立走行の制御

3.1. 施設通路の走行

利用できる自立走行方式としては、大別して1) 誘導路方式、2) 誘導マーク方式、3) 定点観測方式、4) 自律型移動方式がある⁵⁾。誘導路方式は床面テープや埋め込みワイヤなどによる簡単な制御方式であるが、床面テープは埃による誤動作の危険性が大きく、またワイヤを通路に埋め込むのは大がかりな作業となる。誘導マーク方式は壁や天井に適当な間隔で設けた各種のマーカ（マーク）から走行経路を知るもので、離散的な誘導路と言える簡単な制御方式である。走行経路の設置や変更が容易であるが、安定して動作するマーカとセンサの選定が必要である。定点観測方式は幾つかの定点と移動物体間で信号の送受信を行うことで現在位置を推定し走行制御を行うものである。自由度の高い移動が可能となる反面、制御処理がやや複雑となり、また利用可能なビーコンの選定が重要となる。自律型移動方式は外界に信号源を用いず、地図データなどの知識を持ち、周囲環境を認識しこれに適應して走行するものである。複雑な知的制御を行うため制御システムの負担は極めて大きい。

これらの中から、高齢者施設での使用に適した制御方式を選定する。

まず周囲の人間との共存については、歩行者のような動的な障害物に対処するためにリアルタイムで処理できる簡単な制御方法が必要である。従って、最も高速に処理できる誘導路方式あるいは誘導マーク方式が望ましい。

次に操作・維持の容易さについても、誘導路方式及び誘導マーク方式が優れている。これら

の方式は、定点観測方式や自律型移動方式に比べ原理が単純であるため、専門家でなくとも操作結果を予測しやすく使いやすい。また故障しにくく維持管理も容易であると考えられる。

最後に、走行動作の柔軟性について比較する。誘導路方式では走行範囲が予め決められた経路に限定されており、それ以外の走行動作は不可能である。誘導マーク方式ではマーカ間の走行経路については自由であり、ある程度の柔軟な走行動作が許される。定点観測方式及び自律型移動方式は様々な走行に対応できるが、それだけ複雑な制御内容となり高速な処理が難しくなる。

以上より、処理速度と走行動作の柔軟性を適切なレベルで両立させ得る走行制御方式として、本研究では誘導マーク方式を採用した。この方式では施設内に誘導マーカを設置しなくてはならないが、対象が高齢者施設であることから、機器導入のための些少な内装変更は可能であると考えた。

マーカ信号源としては光や超音波、電波などが考えられるが、高精度かつ容易にマーカ方位を検出するために光を用いる。施設通路では床面は汚れやすいために光マーカは天井に取り付け、その方位を搭乗者頭上のCCDカメラで撮影することで、歩行者に遮断されにくく安定したマーカ検出を目指した。自立走行においては前方マーカの方向により通路直進の際の進行方向を制御し、また頭上を通過したマーカ数により走行経路上の現在位置を推定し右左折や目的地での停止を行う。従って自立走行経路は「3番目のマーカまで通路を直進、右折して通路を直進し2番目のマーカで停止」のように指示される。

3.2. 障害物への対処

周囲の障害物については、高齢者施設では移動中の高齢者の安全のために通路は整備されており通行の障害になるような備品類、壁や床の凹凸は存在しないと考えた。そのため通路を移動する歩行者や運搬ワゴンに対してのみ危険回避処理を行えばよい。このような移動物体に対

する衝突回避の手段としては進行方向はそのままに保ち速度を変更する方法がある⁶⁾。我々のシステムでは進路上に何らかの物体を検出した場合一時停止してやり過ごすこととした。工場における搬送システムではサイレンなどで歩行者に注意を促すといった対策が採られているが、本システムのように周囲の人間との共存が必須である場合にはこのような対策は問題となる。本研究では複雑な障害物回避動作を行わず単純な一時停止のみを行うことで最大の安全を確保し周囲の人間との共存を図った。

図1. 施設内自立走行の制御方式

以上に述べた走行制御方法を図1に示す。このような簡単な制御方法は、複雑なハードウェアを用いないため信頼性が高く維持管理も容易である、専門知識を持たずともシステムが次に行う動作が十分予測できるため安全に利用できるといった利点がある。一方、対処できない非常事態も存在するため第三者による走行動作の監視及び非常事態からの復帰操作が必要であるという問題点を持つ。本システムは高齢者施設内で利用されるため介護者がこれらの作業を行うこととなる。

4. 試作システム

採用した制御方式に基づき、実験的な自立走

図2. 試作した自立走行システム

行システムを試作した(図2)。走行部本体として電動車いす(スズキ, MC-14S)を利用し、

図3. CCDカメラの光学系

ノートパソコン (NEC, PC-9801 NS/R) 及び I/O拡張ユニット (アドテックシステムサイエンス, ANE-451) から成る制御部を車いす後部に搭載した。D/Aボード (アドテックシステムサイエンス, AB98-56BV) により左右の後輪のモータ指令電圧を出力し電動車いすの走行を制御する。

マーカ検出センサとしてカラーCCDカメラ (キャノン, Ci-10) を搭乗者頭部後方の位置に

(a). 前後方向の視野分割

(b). 左右方向の視野分割

(c). CCDカメラ画像上の分割視野

図4. 分割されたCCDカメラ視野

図5. 走行制御の流れ

取り付け、フレームメモリ（マイクロテクニカ、MT98CVFM）によりマーカ画像を取り込む。広角レンズを用いて視野範囲を拡大し、更に4枚の鏡によりCCDカメラの視野を分割することで前後左右上の5方向を同時に撮影可能とした（図3）。分割されたCCDカメラ視野の構成を図4に示す。視野確保のためにカメラを機械的に回転させる必要が無いため故障の可能性が低減され信頼性向上が期待できる。

実験に用いる光マーカは、通路天井の通常照明の中から適切な間隔のものを選び出して利用した。これらマーカとして選ばれた天井照明は、色セロハンで覆うことで他の照明や環境光からカラー画像処理により区別するものとした。実験した通路ではマーカはCCDカメラより1.2m上方にあり、間隔は約5mであった。

障害物センサには超音波距離計キット（秋月電子）を用い、車イス前部の左右に取り付けた。距離計の計測可能範囲は±40度であり進路前方の十分に広い範囲内での障害物検出が可能である。距離計測出力はパラレルI/Oボード（NEO LOG, PCN-1098）を介してノートパソコンに入力される。

5. 制御ソフトウェア

試作システムの走行制御は、撮影されたカラーCCDカメラ画像に対して、RGB値を利用した二値化処理によるマーカ像検出と重心位置計算を行った後、1) 通路の直進制御、2) 右左折点

及び目的地到達の判断、3) 障害物検出による一時停止、の各機能を順に実行する（図5）。以下、各々の機能について述べる。

通路直進制御では、前方視野内に検出されたマーカの方角に基づいて車イスの左右輪を駆動し走行方向を制御する。目標マーカとして視野内において最遠方に存在するものを用いることで走行軌跡の安定化が実現できる⁷⁾。前方視野を5分割しマーカの方角に応じて直進及び左右それぞれ2段階から成る進行方向制御を行った（図6）。粗い制御ではあるが車イスの走行挙動は5通りに限定され簡単な制御プログラムとなった。

図6. マーカ方向による進行方向制御

右左折点と目的地到達の判断は、前述のように頭上を通過したマーカ数をカウントして行う。ここでは上方視野と左右視野を用い、通過マーカ数をカウントする。マーカ間隔に対して上方視野は十分小さくなっているため、同時に2つのマーカが視野内に存在することはない。従って単純に視野内のマーカの有無を判別することで通過したマーカ数をカウントできる。

障害物検出は画像処理を行うごとに超音波距離計により車いす前方をチェックして行う。5回連続して距離計測した値の平均が1m以下であった場合、障害物有りと判断して一時停止し安全が確保されるのを待つ。進路前方の安全の判断は最終的に搭乗者が行い、超音波距離計による前方障害物確認に加え、搭乗者によりマウスボタンが押されたことを検知して走行を再開するものとした。

6. 評価実験

試作システムの評価として、電動車いすを25 cm/sの速度で走行させ、直進走行制御機能と障害物検出機能の評価及び総合的な試験走行を行った。実験結果を基に採用した制御方式の改良方針について考察する。

図7.直進走行制御の評価実験結果

6.1.実験結果

通路の直進走行制御の評価実験では、目標とするマーカ方向に対して車いすの初期方向を15, 30, 40度とし、10mの距離を走行させた場合の走行軌跡を測定した。結果を図7に示す。進路中心からの最大変位は初期方向40度の場合に57 cmであった。

障害物検出の評価として、電動車いすを障害物に向かって3m手前から直進させ停止時の障害物との間隔を測定した。10回の試行結果を図8に示す。最悪の場合で37cm手前で停止した。

停止時の障害物までの距離[cm]

図8.障害物検出の評価実験結果

総合的な評価のために実際の建物の廊下にて試験走行を行った。走行経路として、通路の直進、左折して直進、Uターンして直進、右折して直進を順次行う経路を構成した。走行経路の状況を図9(1)~(8)に示す。

一連の走行動作は制御プログラムに予め組み込んでおき、搭乗者の行う指示は最初の走行開始と、一時停止後の走行再開だけに限定した。本システムの総合評価として、このような完全な自動走行を行った際にどのような問題点が生じるかを検討した。

センサーに関する問題点として、窓ガラスによる光マーカの反射像を検出してしまい、これ

(1) 走行開始

(5) Uターン

(2) 通路を直進

(6) 直進して右折開始

(3) 左折

(7) 右折後、直進

(4) 通路を直進

(8) 走行終了

図9. 総合試験の走行経路の状況

を目標マークとして誤った方向へ走行した場合があった。

また走行駆動系については、与えた走行指示と実際の走行軌跡が大きく変位し、壁に近づきすぎて一時停止するなどの現象が見られ、その原因は前輪キャスターの方向であった。直前までの走行経路によっては前輪キャスターの方向が指示された走行方向に対して大きく異なることがあり、走行指示後に徐々に前輪キャスター方向が修整されていくために大きな走行軌跡の変位が生じていた。

6.2. 制御方式の改良方針

直進走行制御の評価実験では走行軌跡の最大変位は57cmであった。車いすの全幅が60cmであることから必要な通路幅員は174cm以上となる。東京都の整備指針では車いすがすれちがって通行する通路に必要な幅員は180cm⁹⁾とされており、実験結果はこの通路幅員では殆ど余裕が無いことを示している。実際の利用のためには走行軌跡を更に安定化しなくてはならず、そのために現在5方向で行っている進行方向制御をより細かくすること、また右左折などの後、車いす方向を目標マーク方向に一致させてから直進走行を開始することも必要である。

障害物検出の閾値は1mとした。この値をより遠距離にすることで衝突に対する安全性は確実になるが、曲がり角などで施設通路の壁を検出し走行を停止してしまう可能性も高くなる。従って自立走行システムを導入する施設の状況に合わせて閾値を設定しなくてはならない。場合によっては走行システムが自力で復帰できない状況も考えられるため、搭乗者や介護者による停止状況の判断と走行への復帰操作が必要不可欠である。

試験走行から幾つかの問題点が明らかになった。目標マークを正しく検出するためには、使用するマーク光の波長やCCDカメラの光学系の改良が必要である。具体的な改良点としては、マーク光源として近赤外光（波長800nm付近）の採用、窓ガラスによる反射像を除くための偏光フィルタの利用が挙げられる。

また前輪キャスター方向による走行軌跡の変位については、前方マーク方向に車いすの直進走行制御をより細かくすることや、エンコード等により前輪キャスター方向を検出することで解決できると考えられる。

7. 実用化のための課題

7.1. ユーザ・インターフェース

試作したシステムは目的地まで自動走行するものである。目的地は居室の他に食堂、浴室やトイレなどに限定されており、数個のスイッチやメニューなどで指示可能であるため、極めて簡単なユーザ・インターフェースで実現できる。

しかし自分自身で走行操作を行いたいという意欲を持つ高齢者も存在する。このような高齢者に対しては、通路の直進や右左折、障害物対処などの機能を適宜組み合わせ「半自動走行」システムを構成し、高齢者自身によるジョイスティック操作を補助するシステムを実現することで対応する。これにより高齢者や障害者のための電動車いすの適用範囲拡大が期待できる。

以上のように、本システムは個々の高齢者の身体的・精神的状態に適合したユーザ・インターフェースを用いる必要があり、そのため多様なインターフェースを利用可能としておかなくてはならない。

7.2. 走行制御システムの拡張性

今後の方向として、施設内地図の利用、複数の走行システムの交通管理や屋外での自立走行が挙げられる。こうした課題に対する本システムの拡張性について考察する。

施設内地図は、搭乗者の要求に応じた様々な目的地に向かって走行可能とするために必要なものである。光マーク誘導による走行方式は通路中のマーク数という簡単なパラメータで地図を構築することができるため、専門知識を持たない施設職員にとって取り扱いの容易な方法であると考えられる。

また将来的には自立走行システムの複数台の同時走行が予想され、そのための交通管理は安全確保の観点からナースセンターなどの監視下

に行われる必要がある。本システムでは光マーカを交通信号として利用できるため、ナースセンターなどから通路各所の光マーカを制御することで施設全体の自立走行システムの交通管理を行うことができる。個々の走行システム自体の機能はマーカの指示に基づいて走行するだけに止めておくことで簡単な制御方法による高信頼性の実現が可能である。

屋外の自立走行については、我が国においては屋外の状況はまだまだ整備されておらず現段階では実現困難である。しかし高齢者の自立生活の支援のためには屋内移動のみならず屋外移動の自立も重要であるため、解決すべき課題の一つとして検討していかなくてはならない。

8. まとめ

高齢者施設において利用するための自立走行システムについて、1) 走行者など周囲の人間との共存、2) 専門の技術者ではなく看護婦などが使うため操作・維持の容易さ、3) 周囲状況や搭乗者の意思の変化に対応できる柔軟性という開発上の要点を考慮し、光マーカ誘導による通路走行機能と超音波距離計による周囲の歩行者に対処する機能を備えた走行制御方式を用いた試作システムを開発した。

評価実験により直進走行制御方式の改良、光マーカ検出の信頼性向上が必要であることが明らかになった。実用化の課題としてユーザの状態に応じた走行操作の補助を行う「半自動走行」システムへの応用、将来的な複数の自立走行システムの施設内交通管理への拡張などが挙げられた。本システムはこれらに容易に対応可能である。

今後の我が国では高齢者の在宅介護を推進していく方向にあり、身体障害が軽度である場合には高齢者は自宅で自立して生活していくことになる。従って施設においては益々重度の身体障害を持つ高齢者の比率が増加し、本研究のような自立走行システムは今後更に重要なものとなると考えられる。

以上より、光マーカによる誘導を用いた自立走行システムは施設において高齢者のQOL向上

及び介護作業の負担軽減に貢献するものであり、更には将来的な拡張が可能である実用性の高いシステムであると考えられる。

尚、本研究は平成5年度厚生科学研究費補助金・長寿科学総合研究事業(No.93A4104)によった。最後に、電動車いすの制御について貴重な技術情報を下さいましたスズキ(株)技術研究所横浜研究部・津田 紘様、前田紀夫様に心より感謝いたします。

文 献

- 1) 厚生省：保健医療・福祉サービスの総合的な展開：厚生白書平成5年版（厚生省編）ぎょうせい，東京，90-187，1994
- 2) 安藤徳彦：評価の実際：日常生活活動（動作）－評価と訓練の実際－（土屋弘吉，今田 拓，大川嗣雄編）医歯薬出版，東京，46-52，1992
- 3) R.L.Madarasz, L.C.Heiny, R.F.Crompt, N.M.Mazur: The Design of an Autonomous Vehicle for the Disabled, IEEE J. Robotics & Automation, 2(3), 117-126, 1986
- 4) 木村一路，大隅善文，大坪研成，只野寿太郎：患者誘導・カルテ・検体運搬用病院ロボット，ロボット，53，116-121，1986
- 5) 江尻正員：自律型移動ロボット：ロボット工学とその応用（電子通信学会編）コロナ社，東京，161-167，1984
- 6) N.C.Griswold, J.Eem: Control for Mobile Robots in the Presence of Moving Objects, IEEE Trans. Robotics & Automation, 6(3), 263-268, 1990
- 7) 鈴木 真，山口伸康，堀井章弘，山内康司，太田裕治，堀内孝，土肥健純：重度身体障害者のための自立電動車椅子の研究（屋内におけるナビゲーションシステム），第7回LST学会大会講演予稿集，23，1992
- 8) 松村 秩：生活関連活動：日常生活活動（動作）－評価と訓練の実際－（土屋弘吉，今田 拓，大川嗣雄編）医歯薬出版，東京，72-81，1992