

視覚障害者歩行ガイドロボットの機構とインターフェース

Mechanical Interface for Walking Guidance of the Visually Impaired

○ 今津篤志 (大阪市立大)

Atsushi IMADU, Osaka City University

Key Words: Walking Guidance, Visually Impaired, Interface

1. 緒言厚生労働省による平成 18 年身体障害児・者実態調査結果によると、1・2 級の重い障害を有する日本の視覚障害者数は 192 千人に達する。視覚障害者の外出を手助けする手段のひとつとして盲導犬が活躍しているが、訓練や飼育のための労力が大きいため、NPO 法人全国盲導犬施設連合会によると盲導犬実働数は 1,070 頭 (2010 年 3 月 31 日現在) である。その不足を補うことおよび動物を飼育できないために盲導犬を使用することができない視覚障害者を補助することを目的として、外界センサの情報を解析・判断してその情報を使用者に伝える歩行ガイドロボットが提案されてきた。

まず 1970 年代に館らは使用者の命令に従って直進や右左折を先導する「服従機能」と、障害物等がある場合に使用者の命令に従わず停止し使用者に知らせる「かしこい不服従機能」などを組み合わせた盲導犬ロボットというコンセプトを提案し試作を行った^{(1),(2)}。その後、森らは歩行ガイドロボット⁽³⁾や携帯型歩行支援装置⁽⁴⁾の開発を行った。文献 1, 2, 3 のロボットでは環境を認識しながらロボットが自走し、それに人間が付いていく形でガイドが行われる。この手法では、まずロボットが十分な走行性能を持っていることが必要であり、特に階段や、乗り物への乗降などで困難が生じる。またロボットが人間と並走するために特別な制御が必要である。さらに文献 1, 4 では交差点を曲がる時や使用者の進行方向がずれたとき音声や振動、電気刺激によって曲がるべき方向を知らせている。しかしながら、これらの手段による教示は、通知時間や操作量が離散的にならないという問題がある。

そこで本研究では、使用者のペースで安心して歩行ができ、移動方向の補正量を時間、操作量の両方の意味で連続的に使用者に伝えることができる新しいインターフェース機構を提案する。提案した機構を用いて健常者が目隠しをして歩行する実験を行い、評価した結果を報告する。なお歩行ガイドロボットとしては外界センサの情報を解析・判断する部分が非常に重要であるが、本報告ではインターフェース部分に重点をおいているため、簡易的な環境認識処理しか行っていないことをあらかじめお断りしておく。

2. 提案機構

提案する機構の概略図を図 1 に示す。前輪 1 輪、後輪 2 輪の 3 輪の前輪操舵車両であり、3 つある車輪はすべて非駆動である。後輪には電気的に ON/OFF できるブレーキを設けている。杖のような長いハンドルが操舵部分にユニバーサルジョイントを介して接続されており、アクチュエータにより操舵部分が回転すると、同時にハンドルがひねられる。また、ハンドルの根元に高さを変化させることのできるアクチュエータを有する。

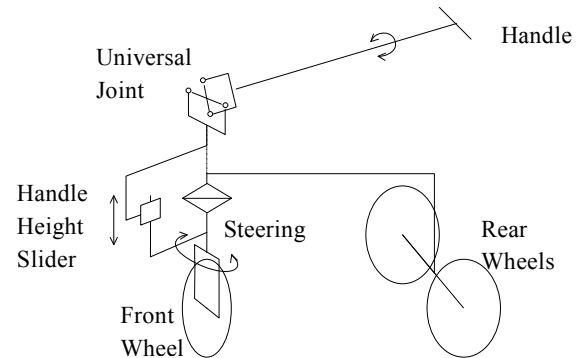


Fig. 1 Proposed Interface Mechanism

提案する図 1 の機構の歩行ガイドインターフェース機構としての特徴は以下の 3 点である。

1. 機構自体に走行アクチュエータが無く、使用者がハンドルを押すことによって、使用者の歩行に合わせて進む。障害物や危険を検知したときは、ブレーキによって停止する。
2. 機構は外界センサの情報を判断して操舵を行う。同時にこの操舵角度がハンドルのひねりとして使用者に伝達される。
3. 階段や段差の前では、ハンドルが上下して使用者に情報を伝える。

以下で、それぞれの特徴を詳細にする。

特徴 1 によって、簡単な構成で使用者が自分のペースで安心して歩行できる。自走式のロボットでは人間とロボットの並走のために工夫が必要となるため、文献 1 ではロボットが人間の位置を超音波センサで測定して等間隔に保つ制御を行い、文献 2 ではハンドルにひずみセンサを設置して操作力を測定しロボットの速度を決める制御を行っているのに対して、本機構では制御が不要である。

また走行機構を持たないため機構が軽量であり、階段などでは使用者が機構を容易に持ちあげて運ぶことが可能である。そのため複雑な階段踏破機構などは不要である。また走行にエネルギーを使わないためバッテリーの寿命も長く、押されて動くときの後輪の回転を用いて発電する方法で、さらに寿命を長くすることも可能である。

特徴 2 の方向教示に関して、文献 4 ではリュックサックの左右の肩ベルト部分に設置したバイブレータを振動させて方向を修正すべき向きを伝えていたが、修正の強度を伝えるために振動の強度や回数を用いることが必要で修正量の分解能は大きくない。文献 3 では、手押し台車のハンドルのようなハンドルに人間が捕まっていることによって結果として連続的に方向修正を伝えていたが、ロボットが交差点で曲ろうとして操舵を行っても、その時点では使用

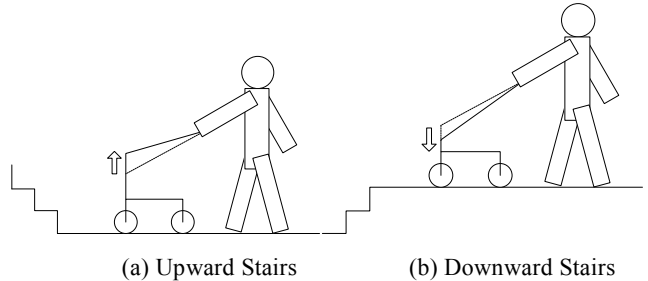
者には伝わらず、その後押していくと車両の方向が曲がっていくことによって初めて使用者に伝わる。それを補うために文献3では旋回時に方向を音声で別途知らせる方法を取っている。

一方、提案機構の特徴2の操舵をひねりで伝える機能によって、使用者がロボットの指し示す方向を常時、連続量として知ることができる。図2および図3に示すように車両が左に旋回するときはハンドルが使用者側から見て反時計回りに(図2, 3(a)), 車両が右に旋回するときはハンドルが時計回りに(図2(b), 3(c))ひねられる。この動きは使用者にとっては前腕の回旋にあたり、車両を押す動作とは非干渉である。つまり、使用者にとって、車両を押す力を加えつつ、前腕の回旋方向は力を緩めてロボットの動きに従って回されるようにしておくことは矛盾のない容易な動作である。

伝達にユニバーサルジョイントを用いていることにより、使用者の身長の違いや持ち手の高さの違いによってハンドルの水平からの角度が変わっても問題が無い。一方、ユニバーサルジョイントの特性により操舵角度とハンドルのひねり角度とは厳密には同一ではない。図4に軸間角度が45度で図2に示した初期位相のときの入出力の関係を例示する。しかし、入出力関係が単調増加であること、軸間の角度が45度のときの最大誤差が10度程度であること、ステアリング角度も高々±60度程度でありその範囲では傾きもほぼ一様であること、などからインターフェースとしては問題とならないレベルと考えられる。

特徴3は、盲導犬が階段に出会ったとき前足を階段の一段目に載せた状態で止まり、ハンドルの水平からの角度が変わることによって使用者が階段の存在、上り下りを知る

ことができることを模擬した、図5に示す機能である。使用者の聴覚を阻害しないため音声による伝達を極力行わないこと、インターフェースを一か所にまとめること、を考慮した。階段を認識したら使用者が本機構を持ちあげて、階段を上り下りすることを想定している。階段の終了を検出したことを伝達するために杖の操舵アクチュエータを細かく振動させてバイブレータの代わりにさせることも可能である。



(a) Upward Stairs (b) Downward Stairs

Fig. 5 Information Method of Stairs

3. 実験方法

3-1 実験機

作成した実験機の外観を図6に示す。なお、特徴3のハンドル上下機構は、今回は実装されていない。前後の車輪は市販のシルバーカーを分解した車輪を使用した。操舵用のアクチュエータはホビーロボット用の小型サーボモータ(Robotis社製 AX-12, 最大トルク 1.2Nm)を用いた。ブレーキもシルバーカーのブレーキシステムを用いており、ブレーキワイヤーを操舵と同様のホビーロボット用サーボを用いて引き絞ることによってブレーキシューに相当する金属部品が車輪に押し当てられてブレーキがかかる。

環境センサとして、機構の前端にレーザー測域センサ(北陽電機株式会社製 URG-04LX-UG01, 角度分解能 0.36度, 距離分解能 1mm, 距離精度±30mm)を使用した。



Fig. 6 Experimental Mechanism

図7に実験機の電機系システムを示す。レーザー測域センサの距離情報をノートパソコン(Intel Core2Duo 1.2GHz)に取り込み、環境認識の結果から操舵角度およびブレーキのOn/Offを決定し、それに基づいて操舵モータとブレーキモータを制御する。後輪にはそれぞれロータリーエンコーダ(2048PPR, 0.11mm/pulse)が取り付けられているが、今回はデータ取得のためにのみ用い、環境認識や制御には用いていない。

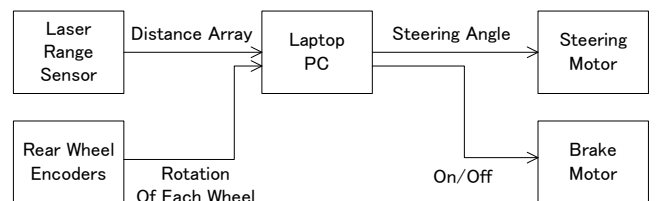
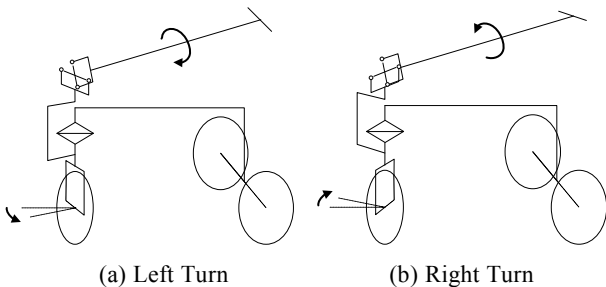


Fig. 7 Experimental Setup



(a) Left Turn (b) Right Turn

Fig. 2 Steering and Handle Torsion Angle



(a) Left Turn (b) Neutral (c) Right Turn

Fig. 3 Pictures of Handles and Steerings

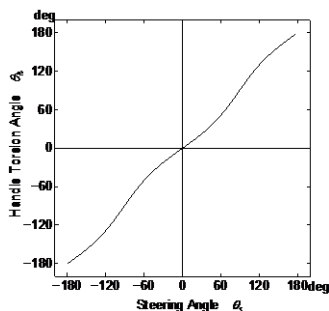


Fig. 4 Relation between Steering and Handle Torsion Angles

表 1 に実験機の緒元を示す。さらに小型化も可能であるが、盲導犬の専有面積と大差なく、小さすぎると周囲の人からの視認性が悪くなるので、妥当なサイズであると考えている。機構の干渉の都合で操舵角を±30度 に制限しているため、最小回転半径は約 0.5m である。

滑らかな廊下の路面を使用したので走行抵抗は小さく、始動時に 3.9N、一定速度走行時に 1.96N の操作力で機構を押すことができた。またブレーキをかけた状態でハンドルをさらに押しと今回使用した路面では 13.2N 以上の操作力をかけたときに車輪と路面の間にスリップが生じた。

Table 1 Dimensions of Experimental Mechanism

Parameters	Values
Weight (Includes Laptop PC and Batteries)	6.1kg
Wheel Base	320mm
Rear Wheel Tread	380mm
Handle Length	765mm
Front Wheel Diameter	130mm
Rear Wheel Diameter	150mm
Minimum Turn Radius(with Steering Angle Limited to ±30degrees)	554mm

3-2 実験内容

本報告での実験は、インターフェースの評価を主たる目的としているため、限定されたコースで簡易的なナビゲーションのみを行った。具体的には、廊下で、廊下の左側の壁に沿う方法でナビゲーションした。マップ情報などは用いていない。被験者は健常者で、目隠しをした状態で歩行した。

図 8 に実験に用いたコースを示す。図 8 は、レーザー測域センサで検出した位置データ点を車両のオドメトリによって求めた位置と方位を元につなぎ合わせて作成した。図 8 の座標(0,0)からスタートして左折し、座標(-25,14)付近のエレベーターホールまで出たところをゴールとする、およそ 40m のコースである。廊下は途中、数か所で柱やゴミ箱などで狭くなっている。廊下の壁は当然直線、直角であるが少し曲がって表示されているのは、オドメトリの誤差のためである。途中に階段やトイレがあるが、右側にあるため今回の実験には影響を及ぼさない。なお廊下の中を通っている点線は、ノイズによって検出されたデータでほぼ車両の通った位置を表している。

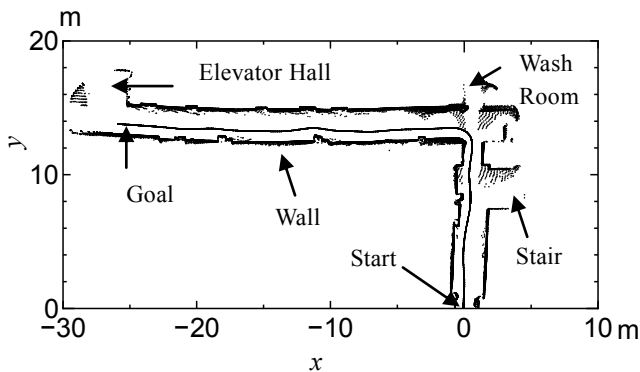


Fig. 8 Experimental Course

3-3 ナビゲーション方法

廊下の左の壁に沿って一定距離を保つナビゲーションを行う。まずレーザー測域センサを使って扇形状に距離を測定し、そのうち機構から見て左 10 度から 90 度までのデータ

対する近似直線を最小 2 乗法により求める。その過程を図 9 に示す。図 9(a)は得られた距離データであり、車両位置を(0,0)として進行方向を X、左壁側を Y+とする。図 9(a)では左と右の壁が見えており、前方はセンサの測定可能範囲外なのでデータが得られていない。図 9(b)において一点鎖線で囲んだ左 10 度から 90 度までのデータを使って、近似直線を式(1)の形で求めた。

$$y = ax + b \quad (1)$$

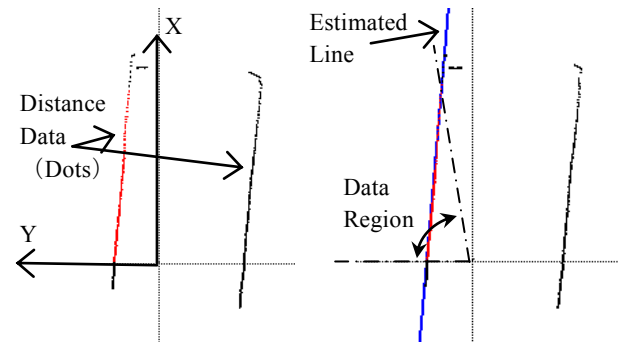
得られた近似直線に対して、直線と機構との距離を与えた距離 r_{ref} となり、機構の方向が直線と平行な方向 ($\theta_{ref} = 0$) となるように、式(2)を用いて車両の向きとの傾きと距離を求め、式(3)のフィードバック制御+時定数 0.3s の 1 次ローパスフィルタで操舵角度を制御した。

$$\theta = \tan^{-1}(-a), \quad r = \frac{|b|}{\sqrt{1+a^2}} \quad (2)$$

$$u = k_p(r - r_{ref}) + k_d\theta \quad (3)$$

k_d と k_p の関係は PD 制御の P ゲインと D ゲインにあたり、その関係は歩行速度に依存し、ある歩行速度で適切なゲインが違う歩行速度では発振してしまう場合がある。今回は歩行速度がそれほど変わらないとして固定値を用いたが、エンコーダで観測した歩行速度に応じて制御ゲインを変えても良い。また実験では機構の制約から操舵角度を左右 30 度までに制限した。

また、前方から左右に 20 度の範囲のデータの平均値が 1.5m 未満となったとき障害物があるとして後輪のブレーキをオンする。



(a) Distance Data (b) Estimated Line for Reference
Fig. 9 Navigation Method

4. 実験結果

3 人の被験者に対して歩行実験を行った。被験者はすべて健常者であり、明るさの違いが認識できなくなる程度の目隠しを実験のときだけした状態で歩行した。練習歩行を数回行い、慣れてきたところでデータを取得した。

壁からの目標距離は 1000mm とし、制御ゲインは試行錯誤により、 $k_p=0.02\text{degree/mm}$ 、 $k_d=0.5\text{degree/degree}$ とした。

得られた車両の軌跡の一例を図 10 に示す。車両のオドメトリの誤差 (特に方向の誤差) により地図がゆがんでしまっているが、左の壁からおよそ 1m でナビゲートされていることが分かる。途中、柱が飛び出している部分では、基準とする直線を左方向視野内のデータの最小二乗法で求める部分に移動平均のような効果があるため、基準とする直線が滑らかに変化し、無理なく追従することができている。

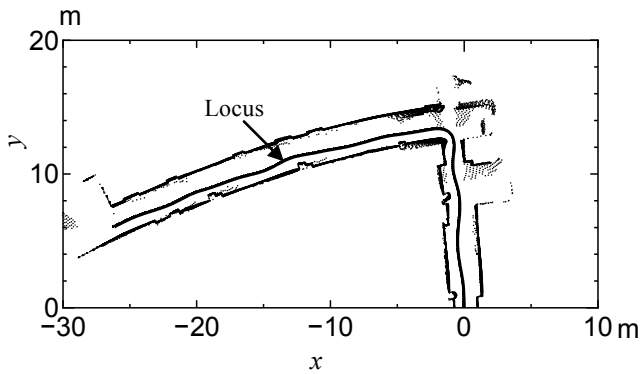


Fig. 10 Locus Result

図 10 の歩行の軌跡上のスタートからの距離と速度を図 11 に示す. ここで速度はエンコーダの差分により求めた. 時刻 10s 付近で速度が遅くなっているところは, 廊下の角を大きく左折するところである. 直線部分ではほぼ一定の速度で約 1.4~1.6m/s の速度で, 遅くなった左折部分では約 0.75m/s の速度, スタートからゴールまでを単純に割ると 1.3m/s (時速 4.6km) となった.

実験した 3 人の 2 回の試行の平均速度を表 2 に示す. 被験者 A は図 10, 11 に示した結果の被験者である. 被験者 B は角を左折するときにも速い速度を保ち, 全体としても速く歩行している. 速度 1.43m/s は時速 5.14km であり, 通常の歩行と変わらない速度である. 被験者 C は全体としてゆっくりと慎重に歩いている. 歩行の速度には非常に大きな個人差があるが, 現状ではそれらに対応できていると言える. 今後, 被験者数を増やしたり, 異なるコースでも確認する必要はあると考えられる.

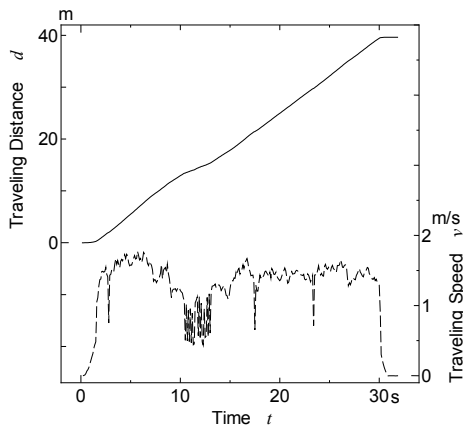


Fig. 11 Traveling Distance and Speed

Table 2 Walking Speeds

Examinee	Straight	Turn	Total
A	1.50m/s	0.74m/s	1.15m/s
B	1.54m/s	1.30m/s	1.43m/s
C	0.82m/s	0.67m/s	0.88m/s

図 12 にブレーキ動作の検証結果を示す. まっすぐ壁に向かって歩き, 壁までの距離が 1000mm 未満となったならブレーキをかけた. 図 12 において実線はレーザー測域センサによって測った壁までの距離, 破線はオドメトリから計算した壁までの距離である. およそ 0.8m/s の速度で歩いて来て 0.65s 付近でブレーキ動作が開始された. そこから車輪の回転が時刻 1s あたりで止まるまでの約 0.35s はブレーキ機構が動作している時間である. 時刻 1s から 1.5s までの間は,

ロックした車輪と床の間にスリップが生じて機構が進んでいる. この間に使用者が, 車輪が止まったこと (森らの提案した“かしこい不服従”) に気づいてそれ以上押すのをやめ, 停止が実現されている. 最終的に停止したときの壁までの距離は 620mm であった.

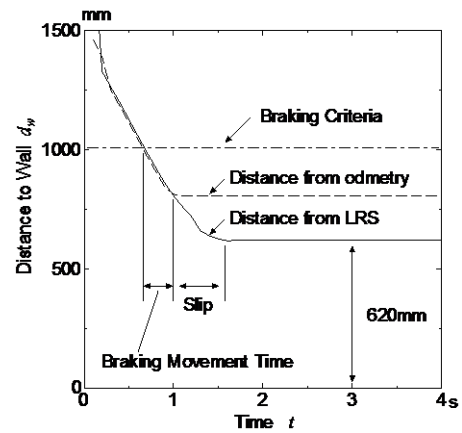


Fig. 12 Result of Braking

5. 結論

視覚障害者の歩行をガイドするために, 方向の補正量を連続量として常に伝えること, 受動的に動くことで完全に使用者のペースで歩けること, を特徴とした新しいインターフェース機構を提案した. 簡単なナビゲーション手法により壁に追従する実験を行い, 方向の補正量を連続量として常に伝えながら歩行をガイドすること, 障害物などがある場合にはブレーキをかけてそれを知らせることが可能であることを確認した.

今後, 自走機能をロボットに追加し, 受動的に動作することの心理的な効果などを検証する予定である. また, 歩行ガイドロボットとして重要だが今回は扱わなかった汎用的な情報処理システムを, 今後搭載していく予定である.

参考文献

- (1) 館, 小森谷, 谷江, 大野, 阿部, 細田, 藤村, 中島, 加藤, 人と一定間隔を保つ移動ロボット制御の一方法, バイオメカニズム 4, pp. 279-289, 1978.
- (2) 館, 小森谷, 谷江, 大野, 阿部, 清水, 松田, ランドマークとマップを用いる移動機械の誘導法, バイオメカニズム 5, pp. 208-219, 1980.
- (3) 丹沢, 佐々木, 清弘, 森, ソナーベース歩行ガイドロボットとその心理学的評価, テレビジョン学会技術報告, vol. 20, no. 46, pp. 79-84, 1996.
- (4) 史, 小谷, 森, 歩行ガイドロボットのヒューマンインタフェース, 日本福祉工学会誌, vol. 4, no. 1, pp. 25-30, 2002.
- (5) 森, 安部, 竹谷, 依田, 小谷, 視覚障害者向け携帯型歩行支援装置による駅における誘導, ヒューマンインタフェース学会研究報告集, vol. 6, no. 1, pp. 63-68, 2004.