

# 視覚障害者のためのナビゲーションロボットの開発 Development of a Navigation Robot for Visual Impaired people

佐野 睦夫<sup>†</sup> 緩利圭輔<sup>†</sup> 井上雄紀<sup>†</sup> 宮脇健三郎<sup>†</sup> 西口敏司<sup>†</sup>

Mutsuo SANO<sup>†</sup> Keisuke YURURI<sup>†</sup> Yuuki INOUE<sup>†</sup> Kenzaburo MIYAWAKI<sup>†</sup>  
Satoshi NISHIGUCHI<sup>†</sup>

<sup>†</sup>大阪工業大学情報科学部

<sup>†</sup>Osaka Institute of Technology

E-mail: <sup>†</sup>sano@is.oit.ac.jp

## 1. はじめに

現在、視覚障害者の歩行ガイドを行う盲導犬は需要に対しては圧倒的に不足しており、代替手段が求められている。また、盲導犬の育成には多大なコストを有する。

実用的な歩行ガイドロボットとしては、手押し車型の歩行支援ロボット [1] や車椅子型のロボット [2] がすでに提案され、車椅子型は実運用されている。しかしながら、これらはロボットと人間が一体化した強依存関係にあり、人間の自然な歩行をアシストするものではない。人間の自然な歩行をアシストする盲導犬タイプの研究としては、ロボットの皮膚感覚による情報伝達に基づく歩行補助の試み [3] など提案されているが、人間と盲導犬ロボットの自然なコミュニケーションを実現するまでには至っていない。

本報告では、視覚障害者と協調歩行する盲導犬ロボットの自律走行機能と自然な歩行をアシストするナビゲーション機能を紹介する。最後に、現在開発を進めている生活支援型盲導犬ロボットのプロトタイプを示し、今後の方向性について議論する。

## 2. 盲導犬ロボットとしての自律走行機能

盲導犬として使用するためには、屋内だけでなく屋外環境においても安定した自律走行機能が求められる。安定した自律走行を行うためには、ロボットが自己位置を正確に求める必要がある。

ロボットの自己位置を求める方法としては、オドメトリを使用する方式があるが、時間と共に誤差が蓄積するという問題があり、長距離の走行を満足する精度を得られない。そこで、ロボットに地図を持たせ、地図から自己位置を求めることで、蓄積誤差のない自己位置推定を行う方式をとる。

走行アルゴリズムとしてはオドメトリを主とし、地図からの自己位置推定によりオドメトリを補正する走行戦略をとる。本自律走行ロボットは、つくばチャレ

ンジ 2009～2012 への参加の中で改良してきた[4][5]。

### 2.1 自律走行のためのロボットハードウェア

自律走行のための基本的なロボットハードウェアの外観を図 1 に、ロボットの機能と対応する搭載センサを表 1 に示す。ロボット上部に搭載されている 2 機の LRF は高所ランドマークを観測するもので、今後の拡張を予定している。走行モジュールとしては、差動走行方式の MobileRobots 社 Pioneer3 AT をベースとして用いている。



図 1 自律走行ロボット外観

表 1 自律走行のためのセンシング仕様

機能	搭載センサ	個数
走行制御	Pioneer3 AT	1
自己位置推定	DGPS : A100	1
自己位置推定 障害物回避	LRF : UTM-30LX	1
エレベータ認識	Kinect	2
高所ランドマ ーク (拡張)	LRF : UTM-30LX	2

## 2.2 走行戦略

ロボットは、事前に作成した地図に基づき走行する。事前にマニュアルでコントロールし、走行環境の地図とサブゴール（ウェイポイント）作成しておき、本走行時には、ウェイポイントに沿って走行する。

## 2.3 屋外環境の地図生成

地図は、距離情報をプロットした占有格子地図を使用し、ロボット前面に搭載した LRF とオドメトリを基に ICP(Iterative Closed Point)[6]を用いて作成する。

ICP により現在の観測と構築中の地図をマッチングし、オドメトリの誤差を補正する。しかし、屋外環境においては、点群の数や幾何学的特徴が乏しいので、GPS を併用する。図 2 に GPS の軌跡、図 3 に ICP により生成した占有格子地図を示す。実際、走行時は、GPS による観測の HDOP や衛星数から自己位置を評価する。図 2 の軌跡に示すとおり、街路樹に囲まれた経路および高い建物に隣接する経路上では、GPS の信頼性が低くなる。GPS データが取得できない区間や取得できても数 m 程度の誤差が存在する。幾何学的特徴が低い箇所では、相対的に GPS データの重みを大きくしている。



図 2 GPS の軌跡



図 3 ICP 手法に基づき生成された屋外環境占有格子地図

## 2.4 屋内環境の地図生成

屋内環境では、ICP による正確な地図が生成できる。図 4 にオドメトリによる自己位置を基に作成した屋内コースの地図を、図 5 に ICP によりオドメトリの誤差を補正した屋内コースの地図を示す。図 5 では ICP によりオドメトリの誤差が補正されている。

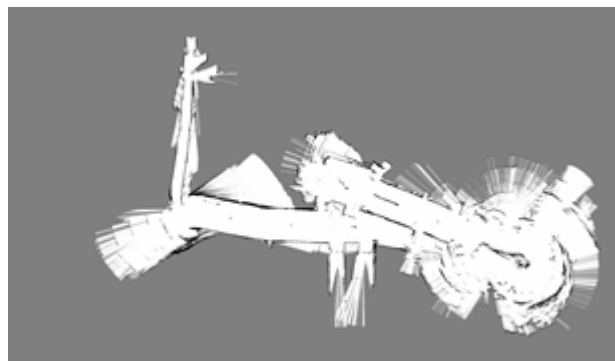


図 4 オドメトリに基づく屋内占有格子地図

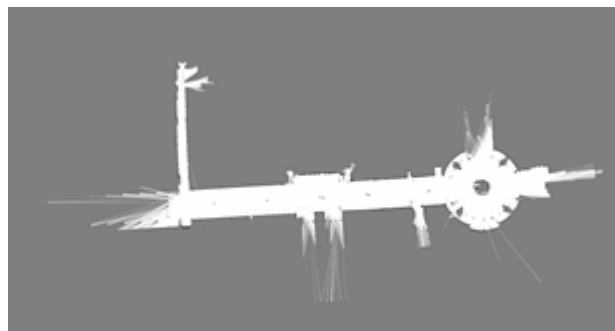


図 5 ICP アルゴリズムに基づく屋内占有格子地図

## 2.5 自己位置推定

自己位置推定はモンテカルロ位置推定[7]により行う。モンテカルロ位置推定では、パーティクルの遷移のための動作モデルと、パーティクルを取捨選択するための尤度関数を与える必要がある。

動作モデルは、オドメトリの座標を平均とするガウス関数でオドメトリの誤差を表現する。動作モデルを基にそれぞれのパーティクルを遷移させる。

パーティクルの尤度関数は Thrun 氏の尤度場 (Likelihood Field) [8][9]により行う。尤度場によりパーティクルの尤度を計算する方法を以下に示す。

LRF により得られる観測  $z_t$  を式(1)で表現すると、地図  $m$  中での姿勢  $x_t$  における観測の確率は式(2)で表すことができる。ただし、 $K$  は計測値数である。

$$z_t = (z_t^1, z_t^2, \dots, z_t^K) \quad (1)$$

$$p(z_t | x_t, m) = \prod_{k=1}^K p(z_t^k | x_t, m) \quad (2)$$

ここで、個々の観測の尤度  $p(z_t^k | x_t, m)$  は式(3)の計測モデルにより求められる。

$\text{prob}(\text{dist}, \sigma_{\text{hit}})$  は、平均ゼロ、標準偏差  $\sigma_{\text{hit}}$  基づいて距離  $\text{dist}$  に対する確率密度を求める関数である。

$$p(z_t^k | x_t, m) = z_{\text{hit}} \cdot \text{prob}(\text{dist}, \sigma_{\text{hit}}) + (z_{\text{random}}/z_{\text{max}}) \quad (3)$$

$z_{\text{hit}}, \sigma_{\text{hit}}$  : 測定をガウス関数でモデル化したときの平均と標準偏差

$z_{\text{max}}$  : 計測の最大値

$\text{dist}$  : 端点の座標と地図  $m$  中で最も近い障害物までの距離

図6にモンテカルロ位置推定のスナップショットを示す。図中の赤い点がLRFによる観測で青い点はパーティクルである。この例では、観測とオドメトリから尤度の低いパーティクルが捨てられ自己位置が推定できていることがわかる。

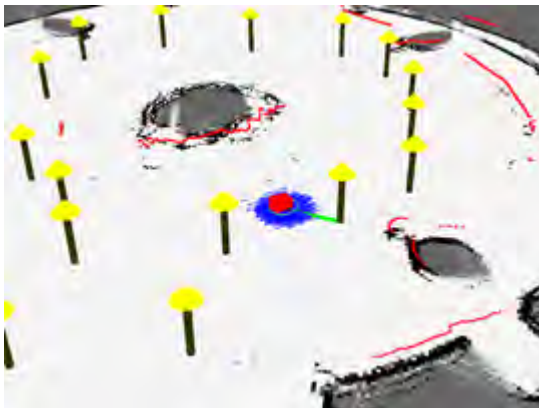


図6 モンテカルロ位置推定のスナップショット

## 2.6 障害物回避

障害物回避については、ロボットの幅の矩形を作成し、距離情報の点群と矩形の内外判定を行う。その矩形を回転させ、走行可能な方向の候補を算出する(図7)。従来方式[10]に較べて、矩形の長さを一定にすることで、内外判定の対象となる点群の削減を図り、高速化を実現している。具体的には、LRFの点と矩形の内外判定については、LRFの点と矩形の各頂点間の角度を反時計方向に加算した合計により判断する。その合計が0ならば外側、 $2\pi$ ならば内側と判定する(図8)。LRFの点と矩形の2頂点が構成するベクトルのなす角度については、単純に、そのベクトルを  $\mathbf{a}, \mathbf{b}$

としたとき、そのなす角度を  $\theta$  とすると式(4)で算出する。ここで、 $\mathbf{a} \times \mathbf{b}$  はベクトルの外積である。

$$\theta = \sin^{-1} \frac{\mathbf{a} \times \mathbf{b}}{|\mathbf{a}| |\mathbf{b}|} \quad (4)$$

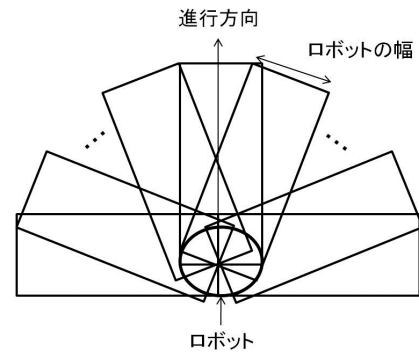


図7 障害物回避のためのパス生成

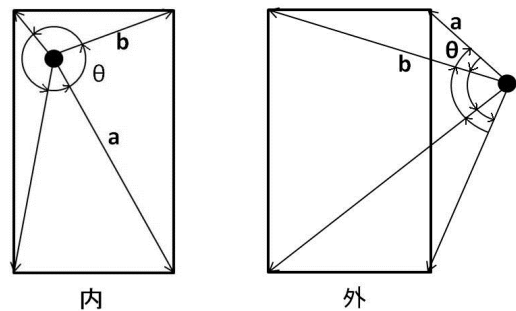


図8 障害物との衝突判定

## 2.7 走行環境認識・理解

自律走行を行うためには、走行環境の認識・理解が不可欠であり、同時に、走行環境情報を歩行者に必要な応じて伝える必要がある。事前に占有格子地図が生成でき、自己位置も推定できるので、実際の地図のセマンティクスと重ねあわすことにより、走行環境の意味付けが可能である。しかしながら、エレベータの構造など地図では表現できない詳細な環境や、地図にはない歩行者の状況などについてはリアルタイムに検出・認識できる必要がある。

歩行者検出とそれに伴うロボット走行制御フローを図9に示す。具体的には、歩行者の運動予測を、カルマンフィルタを用いて実装し、歩行者位置はLRFの出力値から半円モデルのフィッティングを行い検出している(図10)。また、エレベータの構造認識については、図11に示すように、Kinectから得られた色情報と距離情報から、ハフ変換により距離情報か

ら直線を検出し、直線までの距離と HSV の成分に基づき、エレベータの認識やドアの開閉を認識している。

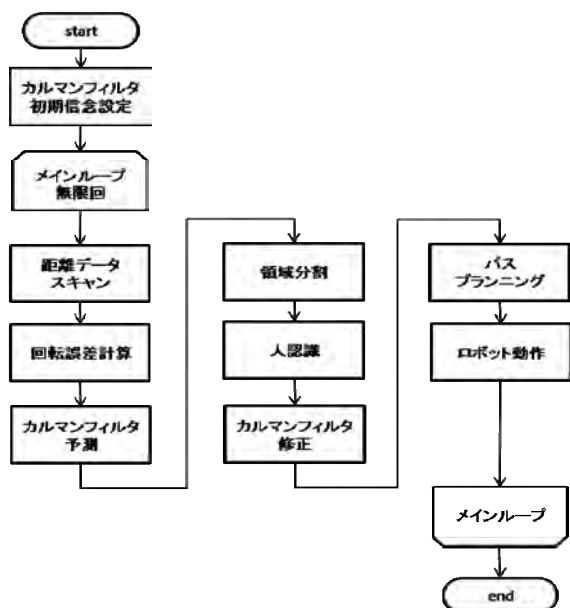


図 9 人物認識・移動予測とロボット移動制御

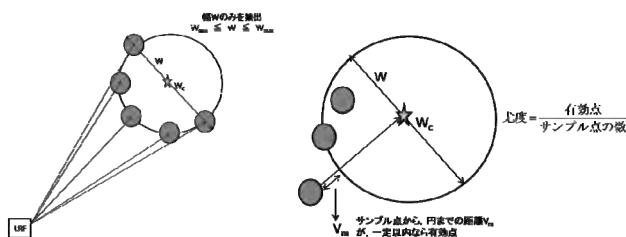


図 10 LRF による半円モデルフィッティングに基づく人物足部認識

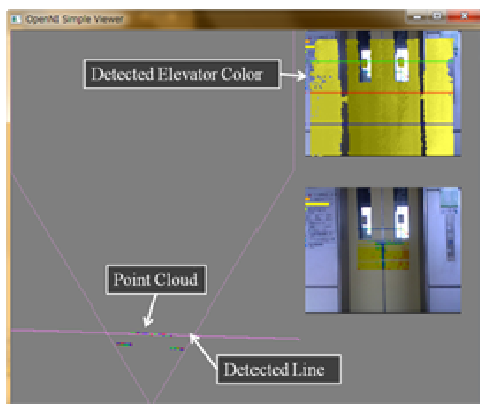


図 11 エレベータ部の認識

### 3. 歩行パートナーとしてのナビゲーション機能

#### 3.1 走行環境認識・理解パートナーインタフェースとしての盲導犬ロボットと要求条件

視覚障害者が現在利用している歩行補助手段としては、白杖と盲導犬であり、入手のしやすさから圧倒的に白杖が多い。白杖にセンシング機能を持たせ、段差などを検出できる電子白杖 [11] もいろいろ提案されている。しかし、センシング範囲が限定されており、自転車などの移動物体を予測するなど高度なセンシング代行はできない。一方、盲導犬のセンシング能力は、広範囲である。ここで、我々は、盲導犬の最大の特長は、歩行以外の生活の場面でコミュニケーションを常にとることにより、視覚障害者との信頼感を構築し、安心感や安らぎを与えることができる点であると捉える。本研究では、盲導犬の広範囲なセンシング機能を活かしつつ、コミュニケーション機能を「介護者」のコミュニケーション機能まで拡張し、人間との真のパートナーインタフェースとなり得る盲導犬ロボットの完成を目指す。

視覚障害者に対して、盲導犬ロボットの使い方に関するヒアリングを行った。ヒアリング結果を以下に示す。

(1) 白杖を見ただけでは道を譲ってくれないことも多いが、盲導犬ロボットは存在感があり、裾払い役としての機能を持っており、安心して歩行できる。

(2) 足元を確認するために、白杖は必要であり、盲導犬ロボットは白杖では感知できない周囲の危険を知らせてくれればよい。

(3) 歩行時は、環境音を絶えず聴いているので、音声による情報伝達は必要などきにのみにしてほしい

(4) 情報伝達のタイミングは、数秒先読みして伝達してほしい。

#### 3.2 基礎実験

視覚障害者の歩行状態を想定し、晴眼者に目隠しを行い、白杖のみを用いたときと、LRFによりセンシングし環境情報を音声で伝達する方式を用いたときの歩行リズムを、足の膝下に加速度センサを装着して、5人の被験者に対して廊下の角を曲がるタスクを与え、歩行ダイナミクスが維持されるか否かを評価した。図 12, 図 13 はそれぞれ、白杖のみ、本システム使用の歩行リズム例（グラフ上から x 軸, y 軸, z 軸の遷移）を示す。白杖のみでは、角を曲がる時は、歩行リズムの乱れが確認されたが、本システム使用時には、目隠しをしていない状態の歩行リズムとほぼ同一になった [12][13]。

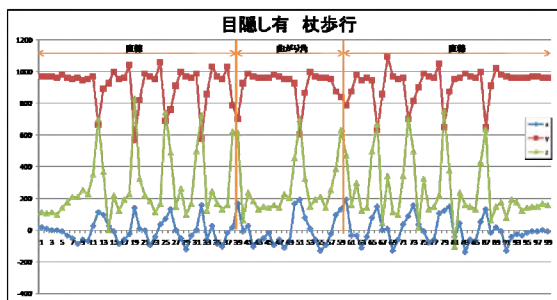


図 12 白杖のみを用いたときの歩行リズム

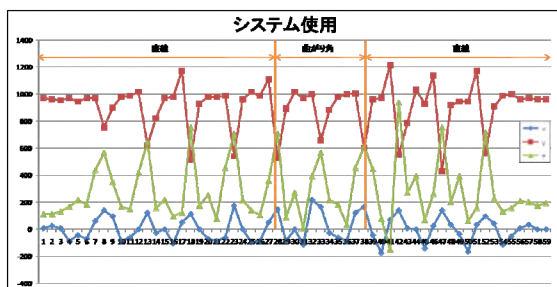


図 13 LRF センシングにより環境情報を伝えたときの歩行リズム

### 3.3 歩行支援インタラクションの階層モデル[12][13]

実際には、盲導犬ロボットからのセンシング結果に基づき推測されるナビゲーション情報を人間にいかにかに伝達するかが重要となる。絶えず、情報を提示し続けると、視覚障害者にとって負荷が大きくなる。図 13 に提案する歩行支援インタラクションの階層モデルを示す。詳細ナビゲーション層、基本ナビゲーション層、危険度提示層の 3 層から構成され、コミュニケーションチャンネルを、それぞれ、音声（言語）、触覚、振動とし、視覚障害者への情報負荷分散を図っている。実際の盲導犬ではハーネスを介して情報伝達を行い、お互いに確認しあう触覚インタフェースを活用している。本研究では、白杖のヘッドにアクティブ点字型のグリッパ（現在試作中）を付け、歩行方向などの基本的なナビゲーション情報をお互いに提示し確認しあうことができる構成とする。障害物までのアナログ的な距離（または到達時間）に対しては、白杖ヘッドの振動の大きさにより伝達する。基本的なナビゲーションは、この 2 層により実現させ、音声提示は極力行わない構成が好ましい。何や誰が近づいてきているのか、それがどのような状態なのか、または複雑なナビゲーション情報については、詳細ナビゲーション層において必要に応じて音声（言語）提示を行う構成としている。

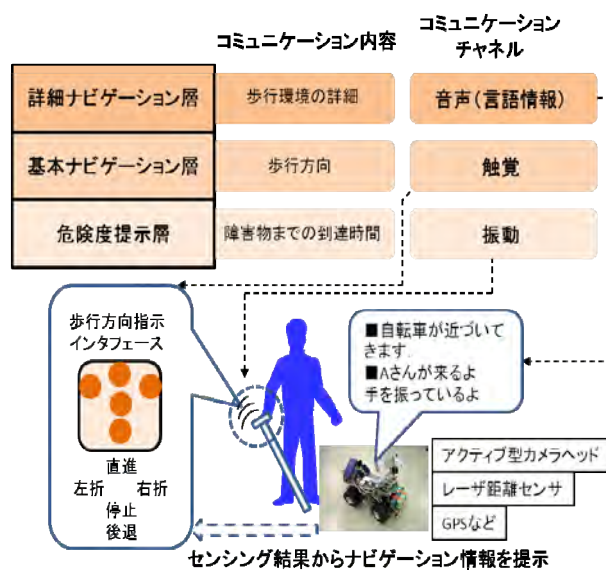


図 14 歩行支援インタラクションのための階層モデル

## 4. 生活支援型盲導犬ロボットプロトタイプ

いままで示したインタラクション設計を踏襲し、屋外と屋内をシームレスに自律移動し、歩行誘導と生活支援を同時にできるロボットのプロトタイプ「プロキオン」[14]を製作した（図 14）。開発コンセプトを以下に示す。

- (1) センシング系：GPS と広い空間をカバーする屋外用 LRF（斜め対向配置＋正面）により、屋内外の自己位置検出および障害物回避を行う。また、Kinect センサとカメラにより、屋内環境と人間の動作・状態を認識する。
- (2) 移動走行系：段差などをクリアできる屋外走行可能な走行系と屋内で自由に動き回れるコンパクトな走行系を同時に満足している。
- (3) 対話系：歩行誘導は力触覚で、生活支援は音声対話で行うことを基本とし、感情などの人間の内部状態を推定し発話生成することにより、自然なコミュニケーションを実現する。ただし、音声入力が必要に応じて前後に倒せるようになっている。音声情報は、自宅ではスピーカ経由で、歩行時はヘッドフォン（開放型）経由で、視覚障害者に伝える。



図 15 生活支援型盲導犬ロボットプロトタイプ「プロキオン」の外観

## 5. まとめ

本報告では、盲導犬ロボットとしての自律走行機能および、歩行パートナーとしてのナビゲーション機能を実現する諸技術について紹介するとともに、現在、開発を進めている生活支援型盲導犬ロボットプロトタイプ「プロキオン」の概要を紹介した。現在、開発中であり、今後、実証実験を重ね、視覚障害者にとって真のパートナーとなるロボットを開発していく予定である。

今後の大きな課題としては、走行環境や生活環境を音声以外の触覚インタフェースとしてどのように実現するかであり、現在検討中である。

また、現在、走行環境や生活環境の認識出力としては、障害物、人物、壁やエレベータなどの基本的なものに限定されている。一般物体認識により、環境情報の構造化を行い、映像の言語化を実現していく予定である。

## 文 献

- [1] 森英雄, “歩行ガイドロボット実用化のための研究開発について,” 精密工学会第2回動画画像処理実用化ワークショップ, pp.72-75, 2001.
- [2] 神山洋一, 中田貴映, 森英雄, “視覚障害者向けインテリジェント車椅子“ひとみ”の研究開発,” 信学技報 WIT2006-54, pp.25-28, 2006.
- [3] 舘 暲, 小森谷清, 谷江和雄, 大野武房, 阿部稔, 細田祐司, 藤村貞夫, 中島英博, 加藤一郎, “人と一定間隔を保つ移動ロボット制御の一方

法,” バイオメカニズム学会論文誌, Vol.4, pp.279-289, 1978.

- [4] 緩利圭輔, 大神仁, 橋本和樹, 森家大治, 小山晃司, 宮脇健三郎, 西口敏司, 小松信雄, 井上雄紀, 佐野睦夫, “屋内外のセンシング環境に適應できるロボットナビゲーション,” 第12回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2011, 2011.12.
- [5] 緩利圭輔, 藤川貴史, 星野仁義, 石谷孝夫, 濱邊良充, 諸隈功, 小山晃司, 角哲郎, 井上雄紀, 西口敏司, 小松信雄, 佐野睦夫, “実世界における自律移動ロボットの地図生成と自己位置推定,” 第11回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会 SI2010, 2010.12.
- [6] P.J. Besl, H.D. McKay, “A method for registration of 3-D shapes,” IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 1992.
- [7] Frank Dellaert, Dieter Fox, Wolfram Burgard and Sebastian Thrun, “Monte Carlo Localization for Mobile Robots,” In Proc. of IEEE ICRA, pp.1322-1328, 1999.
- [8] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard, and Dieter Fox. “Probabilistic Robotics,” 2005.
- [9] Sebastian Thrun, Wolfram Burgard and Dieter Fox, 上田隆一訳, “確率ロボティクス,” 毎日コミュニケーションズ, 2007.
- [10] 大島 章, “移動ロボットによる計測センサを用いたセンサベースとナビゲーション,” 第8回計測自動制御学会システムインテグレーション部門講演会, 2007.
- [11] 村上満佳子, 立石敏孝, 井村誠孝, 安室喜弘, 黒田知宏, 眞鍋佳嗣, 千原國宏, “視覚障害者のための状況推定を導入した電子白杖の構築システム,” 制御情報学会論文誌, Vol.16, No.6, pp.287-294, 2003.
- [12] 佐伯豪介, 佐野睦夫, “視覚障害者の歩行ダイナミクスを考慮した巡回指示タイミング生成,” 電子情報通信学会 関西支部 学生会 第15回学生会研究発表講演会, 2010.
- [13] 佐野睦夫, “人間と協調歩行する盲導犬ロボットのインタラクション方式,” 第24回人工知能学会全国大会, 2010.
- [14] 佐野睦夫, 宮脇健三郎, 井上雄紀, 西口敏司, 橋本渉, “生活支援型盲導犬ロボット「プロキオン」の開発,” 日本ロボット学会学術講演会, 2011.