

# 全方向移動可能な床磨きロボットの 自己位置推定手法に関する研究 (第2報)

布施嘉裕・古屋雅章・阿部 治・西村通喜・吉村千秋  
小谷信司\*<sup>1</sup>・丹沢 勉\*<sup>1</sup>・渡辺寛望\*<sup>1</sup>・井上敬一\*<sup>2</sup>・天野 太\*<sup>3</sup>

## A Research of Localization for Omnidirectional Twin Brushes Floor Polishing Robot (2nd Report)

Yoshihiro FUSE, Masaaki FURUYA, Osamu ABE, Michiyoshi NISHIMURA, Chiaki YOSHIMURA,  
Shinji KOTANI\*<sup>1</sup>, Tsutomu TANZAWA\*<sup>1</sup>, Hiromi WATANABE\*<sup>1</sup>, Keiichi INOUE\*<sup>2</sup> and Futoshi AMANO\*<sup>3</sup>

### 要 約

廊下や部屋等の狭い範囲の床を磨くことを目的とした全方向移動可能な床磨きロボットに搭載する自己位置推定手法について、測域センサによる自己位置推定手法に用いる地図の作成方法を提案した。また、赤外線領域を使用しているグローバルビジョンシステムを用いてロボットを制御した結果、目標精度内での制御を実現できることを示した。さらに、床に洗剤を撒いたときのロボットの制御結果を示すとともに、洗浄評価を行い、本ロボットでの床面洗浄作業は有効であることを示した。

### 1. 緒 言

人間が操作することなく自律的に床面を清掃するロボットが開発されており 1), 2), 実際に清掃現場において使用される例も増加している 3)~5)。しかし、業務用清掃ロボットは移動に必要な駆動部と床を清掃する洗浄部が独立した形で搭載されており、また、回転ブラシの床からの反力を抑えこむため車体重量を重くする必要があり、大型となっている 6)。そのため、廊下や部屋等の狭い範囲の床磨きを行うことを目的とし、持ち運びが容易なロボットが求められている。そこで、床を磨くブラシを駆動系に応用した、2 個のポリッシャを有する床磨きロボット“ツインポリッシャロボット”7)及び“DUALPOD”(Fig.1)の開発を行っている。



Fig. 1 : DUALPOD

DUALPODはDUAL floor POLishing Drive systemの略で、姿勢を保ったまま任意の方向に移動が可能となっている。

第1報8)では、DUALPODに搭載する2種類の自己位置推定手法9)について述べた。このうち、測域センサ(LRF)による自己位置推定手法では、あらかじめ地図を用意しておく必要がある。本稿では、この地図を作成する方法について提案する。また、第1報で開発した赤外線領域を使用しているグローバルビジョンシステムをDUALPODに搭載し、制御を行った。その結果について報告する。さらに、床に洗剤を撒いたときのロボットの制御結果を示すとともに、洗浄評価についても述べる10)。

### 2. 実験方法

#### 2-1 地図作成

Fig. 2のように約0.9m×1.8mの合板を使用した壁に覆われた約3.6m角のエリアを環境として与えた。また、地図作成時の位置合わせに用いるマーカーとして、環境中に高さ約0.9m、30mm角の角柱を置いた。

DUALPODの正面と背面にLRF(北陽電機製レーザー式測域センサ UBG-04LX-F01)を搭載し、Fig. 3の4パターンのLRFデータを取得する。なお、データ取得はロボットの構造上-90deg~+90degの範囲に限定する。

この4パターンのLRFデータを画像に置き換え、マーカーの位置が同じになるようHough変換により回転角度

\*1 国立大学法人山梨大学

\*2 ITR 井上技研株式会社

\*3 株式会社天野製作所

を求めて画像を回転し、重ねあわせる。この作業によりできた画像から再度 Hough 変換を行い、4 隅の座標を求めることで、地図情報とした。なお、LRF データを画像に置き換える際、1pixel を 1cm とした。



Fig. 2 : Environment for map creation

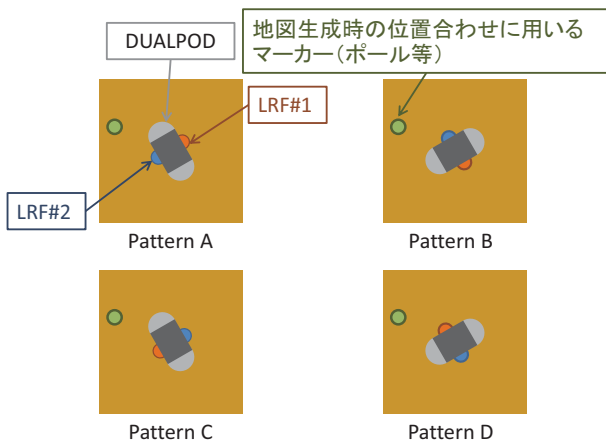


Fig. 3 : 4 patterns of data acquisition for map creation

### 2-2 経路生成

与えられた地図情報に対し、廊下や部屋などの実環境を本ロボットが清掃する場合、壁から壁への往復を繰り返しながら少しずつ前進し、清掃領域を塗りつぶしていく経路が効率的であると考えられる。また、往復の際にブラシが磨く領域をその半径程度重ねればロボットが多少軌道からずれても磨き残しが生じることがない。これらの理由からロボットの経路を Fig. 4 のように決定した。

本ロボットは、床を磨く作業を行うことから、汚れがひどい箇所は時間をかけて磨き、また、磨き残しがないように移動する必要がある。清掃経路としては、前者は速度制御、後者は位置制御が必要であることを示している。ロボットの構造から Fig. 4 のように、X 方向は速度一定、Y 方向は位置一定でロボットを移動させ、Y 方向については、壁から壁への往復の際にはブラシで磨いた部分をブラシの半径約 150mm ほど磨く領域を重ねる必要がある。そのため、目標直線からのずれが 75mm 以下であれば磨き

残しのない移動を行うことが可能である。

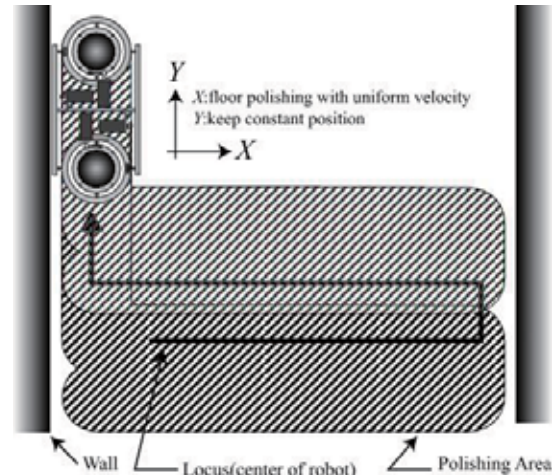


Fig. 4 : Polishing path

### 2-3 赤外線グローバルビジョンシステムを用いた DUALPOD の制御

過去の研究で実施した制御手法 (11), (12) と第 1 報で開発した赤外線グローバルビジョンシステムを統合し、DUALPOD の制御を行った。

### 2-4 床面の状態が異なるときの制御

実際の清掃現場においてポリッシャを使用する場合、洗剤を撒いて床面洗浄作業を行う。床面の状態について摩擦係数が異なると思われる、汚れた床・洗剤を撒いた床・床面洗浄作業後 (ワックス塗布後) の床の 3 種類の床について、前述の「赤外線グローバルビジョンシステムを用いた DUALPOD の制御」と同条件で静止状態を保持するように指令した。実験条件として、以下のとおり設定した。

- ・ブラシはトーロンブラシ
- ・制御で用いる摩擦係数は前述の「赤外線グローバルビジョンシステムを用いた DUALPOD の制御」のときのまま、制御プログラムも変更しない
- ・制御はサーボシステム、静止状態を保持するよう指令
- ・洗剤には、リンレイはくり剤「ギガパワープロ」TRW-13 を使用
- ・ワックスには、リンレイ高濃度樹脂ワックス「超耐久プロつやコート I」TRW-01 を使用

### 2-5 洗浄評価

接触角法による洗浄評価を行った。まず、汚れた床について接触角を測定し、その床に対し洗剤を撒き、ロボットを走行させた。その後に接触角を測定した。

### 3. 結果

#### 3-1 地図作成

Fig. 3 の 4 パターンの状態で取得した LRF データを画像化し、それらの画像をマーカーの位置が同じになるよう Hough 変換により回転角度を求めて画像を回転、重ねあわせた画像を Fig. 5 に示す。

#### 3-2 赤外線グローバルビジョンシステムを用いた DUALPOD の制御

静止状態の場合のグローバル座標系における X 方向, Y 方向の位置および姿勢角  $\theta$  の応答を Fig. 7 に示す. X については $\pm 60\text{mm}$  程度, Y は $\pm 40\text{mm}$  程度,  $\theta$  は $\pm 0.2\text{rad}$

程度の変動で制御されており, 目標精度の範囲内となった. ロボットが静止状態となるのは運動の切り替え時であり, その目的は車体を安定させることにある. この実験結果は, その目的を十分に果たしている.

Fig. 5 の地図画像から Hough 変換を行い, 4 隅の座標を求めた結果を Fig. 6 に示す.

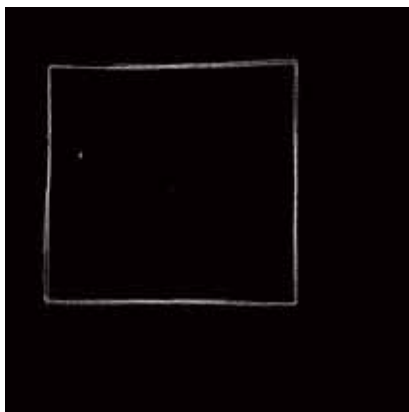


Fig. 5 : A map using 4 patterns

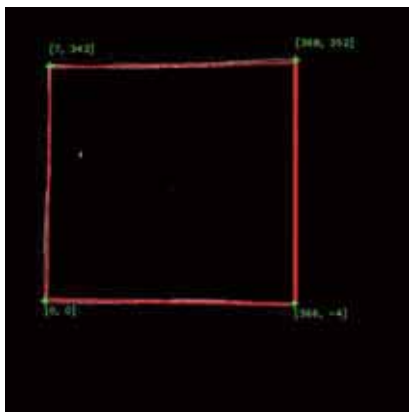


Fig. 6 : A result of Hough transformation

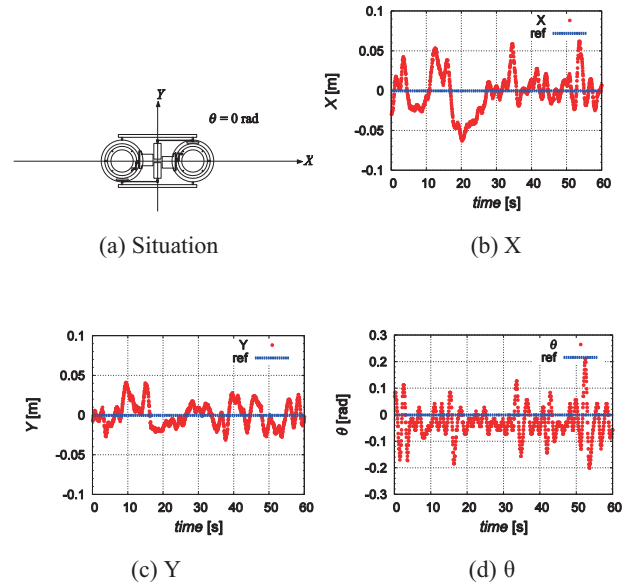


Fig. 7 : Stationary state

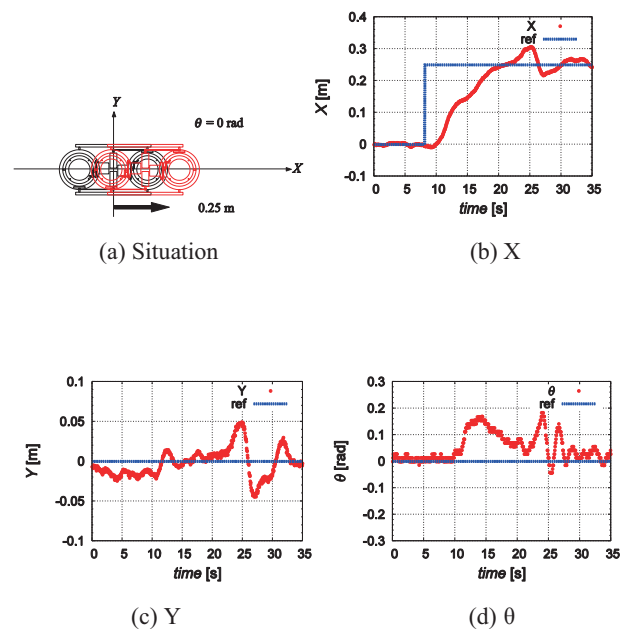


Fig. 8 : Step response of x-direction

Fig. 4 のようにロボットを移動させることを想定し, 静止状態から Fig. 8(a) のように, ロボット中心-ポリッシャ中心間距離である  $0.25\text{m}$  だけ移動させた. このときのグローバル座標系における X 方向, Y 方向の位置および姿勢角  $\theta$  の応答を Fig. 8 に示す. X については約  $15\text{s}$  で収束し, 収束後の最大偏差は約  $50\text{mm}$  であった. また, Y については $\pm 50\text{mm}$  程度,  $\theta$  については $\pm 0.2\text{rad}$  程度の変動で制御されており, 目標精度の範囲内となった.

Fig. 4 のようにロボットを移動させることを想定すると, Fig. 9(a)のようにロボットを移動させる場合, 目標値の変化に追従できることと同時に壁際に近づいたときに静止で

きることが重要である。静止状態から Fig. 9(a) のように、速度が 20mm/s となるよう、目標値を変化させながら移動させ、0.6m の位置で静止させた。このときのグローバル座標系における X 方向、Y 方向の位置および姿勢角  $\theta$  の応答を Fig. 9 に示す。X において、最大約 10s の時間遅れが生じているが、速度と位置について指令通りに制御されている。また、Y については  $\pm 75\text{mm}$  程度、 $\theta$  については  $\pm 0.2\text{rad}$  の変動で制御されており、目標精度の範囲内となった。前述の Fig. 8(a)の移動と組み合わせることで、Fig. 4 のように汚れがひどい箇所は時間をかけて磨き、また、磨き残しのない移動を行うことが可能となる。

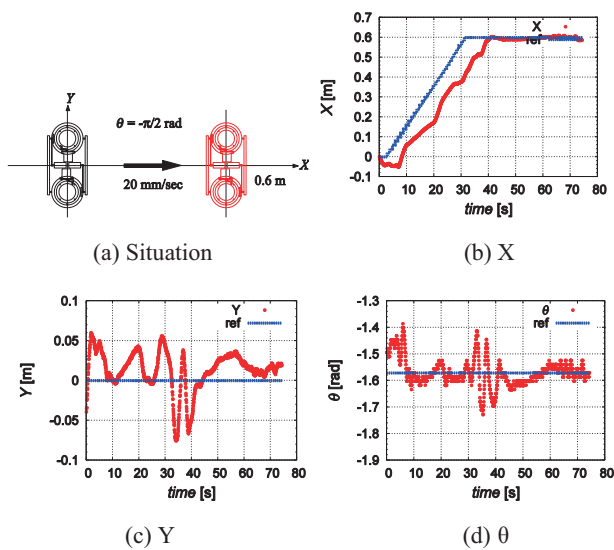


Fig. 9 : Ramp response of y-direction

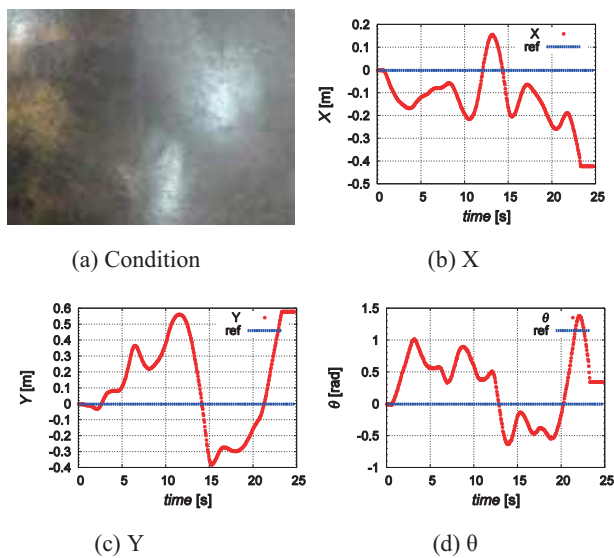


Fig. 10 : Stationary state on a dirty floor



(a) Condition: before

(b) Condition: after

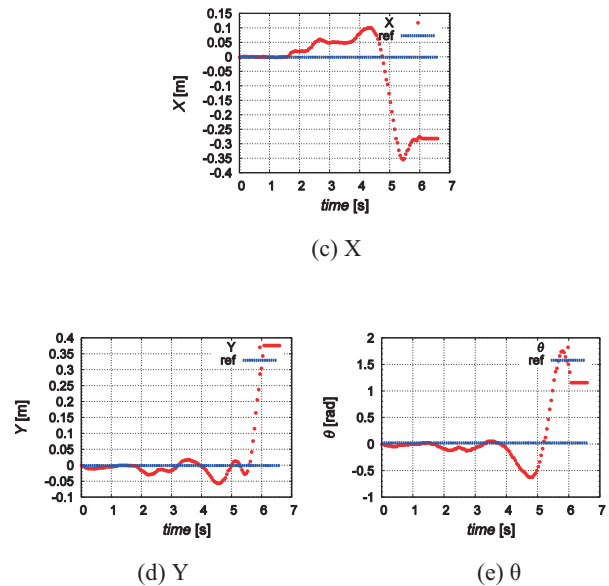


Fig. 11 : Stationary state on washing liquid

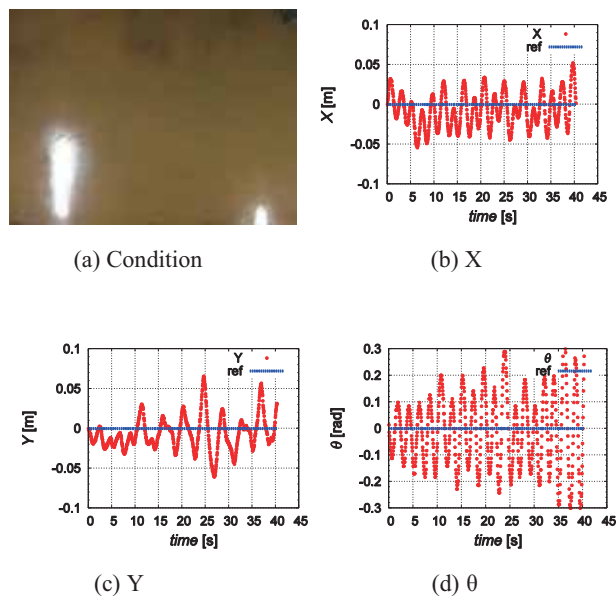


Fig. 12 : Stationary state on a clean floor

### 3-3 床面の状態が異なるときの制御

汚れた床に対して制御を行ったときのグローバル座標系における X 方向, Y 方向の位置および姿勢角  $\theta$  の応答を Fig. 10 に示す. この結果, X, Y,  $\theta$  ともに発振してしまい, 制御できなかった.

次に, 洗剤を撒いた床に対して制御を行ったときのグローバル座標系における X 方向, Y 方向の位置および姿勢角  $\theta$  の応答を Fig. 11 に示す. この結果, 汚れた床のときと同様に X, Y,  $\theta$  ともに発振してしまい, 制御できなかった.

最後に, ワックスがけを含めた床面洗浄作業を行った床に対して制御を行ったときのグローバル座標系における X 方向, Y 方向の位置および姿勢角  $\theta$  の応答を Fig. 12 に示す. X については $\pm 60\text{mm}$  程度, Y は $\pm 60\text{mm}$  程度,  $\theta$  は $\pm 0.3\text{rad}$  程度の変動で制御されており, 目標精度の範囲内となった.

### 3-4 洗浄評価

Fig. 11(b) により床面洗浄作業を行った床に対し, 洗浄評価を行った. 使用した接触角計は, 株式会社マツボー製携帯式接触角計 PG-X であり, 滴下した液体は純水である. 滴下後約 1 分放置し, そのときの接触角を測定する. これを洗浄作業前と洗浄作業後について各 5 箇所計測を行い, その平均値を求めた. 床面の状態と接触角の関係を Table 1 に, 液体滴下 1 分後の状態を Fig. 13 に示す.

Table 1 : Relationship between floor and contact angle

Condition	Contact angle [deg]
dirty	67.0
after polishing	34.4

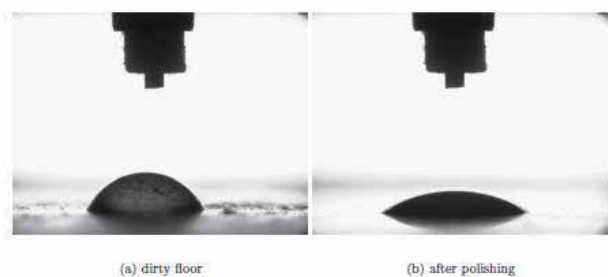


Fig. 13 : Polishing evaluation using contact angle method

## 4. 考察

### 4-1 地図作成

この方法により, 手作業による測定を行うことなく簡単に第 1 報の LRF による自己位置推定手法での地図情報を作成することができる. 本実験環境のような簡単な形状の環境であればこの方法で実現できるが, 実際の環境は複雑

な形状であることが多い. 形状が複雑な環境で自己位置推定を行うためには, 地図画像と LRF データの画像をテンプレートマッチングによって照合することで実現する方法(13)や, ロボットに内界センサ(14)を搭載し, 補正することで実現する方法も考えられる.

### 4-2 赤外線グローバルビジョンシステムを用いた DUALPOD の制御

第 1 報で示した赤外線グローバルビジョンシステムと過去の研究で実施した制御手法を用いて制御を行った結果, 目標精度 $\pm 75\text{mm}$  以内での制御が可能であることを示した.

### 4-3 床面の状態が異なるときの制御

これらの結果から, 床面の状態, すなわち摩擦係数の違いによっては制御できないことを実験により示した. 摩擦係数を測定してから制御することは清掃現場においては非効率である. これを解決するには, 現代制御理論から  $H_\infty$  制御や適応制御の 1 つである MRAC, スライディングモード制御などの制御理論への展開を検討する必要がある.

### 4-4 洗浄評価

汚れた床に対し, 洗剤を塗布しポリッシャ洗浄を行うことで, 接触角が大幅に小さくなった. このことから, 脱脂効果が得られていることがわかる. 洗剤を塗布し, ポリッシャを用いずに拭きとっただけでは汚れは完全に落ちなかったため, これは洗剤の成分による効果とポリッシャ洗浄による効果の相乗効果によるものである. また, Fig. 12(b) により, 走行した部分について, 床面の色が明らかに変わっている. このことから, 本ロボットでの床面洗浄作業は人手による作業と同等の洗浄能力があると考えられる.

## 5. 結 言

第 1 報で開発した LRF を用いた自己位置推定に用いる地図情報の作成方法について, 自己位置推定に使用する LRF と画像処理を用い, 簡単に地図情報を得られる方法について示した. また, 赤外線グローバルビジョンシステムを使用してロボットを制御した結果, 目標精度内での制御を実現できた. さらに, 実際の清掃現場を想定し, 洗剤を撒いた床での実験を行い, 課題を抽出するとともに, 洗浄評価を行い, 本ロボットでの床面洗浄作業は人手による作業と同等の洗浄能力があることを示した.

## 参考文献

- 1) Palacin, J., Salse, J.A., Valganon, I., Clua, X., "Building a mobile robot for a floor-cleaning operation in domestic environments," IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol. 53, issue 5, pp.1418-1424(2004)
- 2) Xueshan Gao, Kejie Li, Yan Wang, Guangliang Men, Dawei Zhou, K.Kikuchi, "A floor cleaning robot using Swedish wheels," 2007 IEEE International Conference on Robotics and Biomimetics, pp. 2069-2073,(2007)
- 3) 青山元, 田島茂樹, 横田和隆, 尾崎功一, 山本純雄: "自律走行式床面清掃ロボットの開発", 日本ロボット学会誌, Vol.16, No.1, pp.57-64(1998)
- 4) Jones, J.L., "Robots at the tipping point: the road to iRobot Roomba,"IEEE Robotics & Automation Magazine, vol. 13, issue 1, pp. 76-78(2006)
- 5) Sewan Kim, "Autonomous cleaning robot: Roboking system integration and overview," Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation, vol. 5, pp. 4437-4441(2004)
- 6) H.Yaguchi, "Robot introduction to cleaning work in the East Japan Railway Company," Advanced Robotics, vol. 10, num. 4, pp. 403-414(1995)
- 7) 布施嘉裕, 丹沢勉, 清弘智昭: 全方向移動床磨きロボットへの非干渉PID制御の適用, 日本ロボット学会誌, Vol.27 No.6 pp. 89-94 (2009)
- 8) 布施嘉裕, 古屋雅章, 西村通喜, 吉村千秋, 小谷信司, 丹沢勉, 渡辺寛望, 井上敬一, 天野太: "全方向移動可能な床磨きロボットの自己位置推定手法に関する研究(第1報)", 山梨県富士工業技術センター平成22年度業務・研究報告, pp. 27-32 (2011)
- 9) Yoshihiro Fuse, Masaaki Furuya, Michiyoshi Nishimura, Chiaki Yoshimura, Hiromi Watanabe, Tsutomu Tanzawa, Shinji Kotani and Noriaki Kiyohiro: Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation(ICMA2011), pp. 1757-1762 (2011)
- 10) 布施嘉裕: "回転ブラシと床面との摩擦を駆動系に応用した全方向移動可能床磨きロボットに関する研究", 山梨大学大学院医学工学総合教育部論文博士学位論文 (2012)
- 11) 布施嘉裕, 吉村千秋, 西村通喜, 清弘智昭, 丹沢勉, 井上敬一: "市販のポリッシャを2対用いた自律型全方向移動可能床磨きロボットの開発(第2報)", 山梨県富士工業技術センター平成21年度業務・研究報告, pp. 60-62 (2010)
- 12) 布施嘉裕, 古屋雅章, 吉村千秋, 西村通喜, 久繁哲史, 丹沢勉, 渡辺寛望, 小谷信司, 清弘智昭: "市販のポリッシャを2対用いた全方向移動可能床磨きロボット "DUALPOD"の開発", 第28回日本ロボット学会学術講演会 RSJ2010AC2P1-1 (2010)
- 13) 監物建秀, 小林祐輔, 渡辺寛望, 小谷信司, "キッドナップ問題に対応した自律移動ロボットのベイズ推定に基づく自己位置推定", 第29回日本ロボット学会学術講演会 RSJ2011AC3I2-2 (2011)
- 14) 久繁哲史, 布施嘉裕, 清弘智昭, "ツインポリッシャロボットのためのオムニホイールを用いた位置・姿勢検出システム", 情報処理学会第73回全国大会 4ZF-2 (2011)