学術論文

自動バランスプラットフォームを有する 自律移動ロボットの開発

Development of an Autonomous Mobile Robot with Balance Platform

佐々木 実^{*1}(正員), ハン カヒョウ^{*1}, 松下 光次郎^{*1}(正員)

Minoru SASAKI (Mem.), Jiabing PAN, Kojiro MATSUSHITA (Mem.)

This research presents development of an Autonomous Mobile Robot with Leveled Platform. Autonomous Mobile system based on information fusion obtained from camera and laser scanner. leveling of the platform was controlled by servo motor based on the posture data from 6 axis sensor filtered by Madgwick filter. Finally, the robot could move autonomously in complicated environments and could keep the platform leveled.

Keywords: autonomous mobile robot, balance platform, Madgwick filter, SLAM.

(2020 年 5 月 20 日受付, 2021 年 3 月 15 日再受付)

1 緒言

近年の産業界の労働力不足の解決策として、軽作業の自動化が注目されており、無人搬送車（自律移動ロボット）の研究開発が進んでいる。従来研究においては、ライントレーサー、ランドマークナビゲーション、測域センサによる自己位置推定など自律移動性能の向上を主眼に置いており、無人搬送車への実用化も進んでいる。それに対し自律移動制御以外の機能である運搬対象である物体の安定化に関する研究は少ないと言える。すなわち、無人搬送車の普及のためには、単なる整地走行だけではなく、屋外農場のような不整地による利用も想定すべきであるため、従来の自律移動制御でナビゲーションは達成できたとしても、運搬対象への過度な傾きや振動が加わったとすると、無人搬送の目的を達成していないことになる。

そこで本研究では、プラットフォーム（荷台）に 6 軸モーションセンサ（加速度 3 軸、ジャイロ 3 軸）とモータを搭載し、不整地の状態に応じたプラットフォーム姿勢制御系を有する自律移動ロボットを提案する。なお、ナビゲーションとしては、カメラによるランドマークナビゲーションと測域センサによる障害物検知を組み合わせた人追従機能を実装し、その上で、実際の不整地（芝生、砂利道）における提案システムの有効

性の検証を行った。

2 提案システム

ハードウェア構成は、駆動車輪用サーボモータ Dynamixel XH540 (2 個)、補助輪 (2 個)、バランスプラットフォーム用モータ (2 個)、6 軸モーションセンサ (1 個)、センサフュージョンプロセス用マイコン (1 個)、USB カメラ (1 個)、測域センサ RPLidar S1 (1 個)、アルミフレーム、Linux 搭載ノート PC である。駆動機構は、Dynamixel モータ駆動 2 輪と補助 2 輪で構成される同軸二輪であり、超信地旋回を可能としている。自律移動制御としては、Linux 搭載 PC の Robot Operation System (ROS) を基盤にカメラ画像分析と測域センサの点群分析を統合し、色ターゲットの方向検出と距離検出を組み合わせ、人の背中の黄色テープをターゲットとした人追従制御を実現している。自動バランス・プラットフォームは、内蔵の 6 軸モーションセンサから得られる加速度値・角速度値に対してセンサフュージョンアルゴリズム(Madgwick Filter)を適用し、姿勢 (Roll 角度・Pitch 角度) を算出、バランス維

連絡先：佐々木 実, 〒501-1193 岐阜県岐阜市柳戸 1-1,
岐阜大学工学部機械工学科,
e-mail: sasaki@gifu-u.ac.jp

^{*1} 岐阜大学

Fig. 1 Proposed robot system.

持のためのモータ角度制御を行う。

2.1 自律移動システム

本研究で提案する自律移動システムは機体方向を制御する画像分析技術による目標識別左右方向調整システムと目標距離を保持する距離接近調整システム二つの部分で構成されている。全体システム構成は Fig. 2 に示されている。左右調整システムはカメラから目標特定色識別後、機体方向調整する。機体方向調整した後測域センサから目標との距離を計算し指定距離まで接近する。その上で、識別できないもしくは目標ロストする場合は自動停止とする。

2.2 カメラ画像分析：色識別に基づく機体左右調整システム

目標識別システムは特定色検出画像分析技術で実現している。カメラ画像から目標を識別するまでの指定色識別、抽出及び重心計算・検出画像分析アルゴリズムを Fig. 3 に示す。カメラから取得した画像をカメラ画像フォーマット RGB (赤, 緑, 青) 色空間から画像処理用フォーマット HSV (色相, 彩相, 輝度) 色空間へ変換, 変換した画像を設定された閾値で二値化処理する。処理した黑白画像を白部分だけ抽出して重心を計算し, 目標点として表示される。

左右方向調整システムを Fig. 3 に示す。カメラから得られた画像の指定色を抽出し目標と識別しながらロボットの中心位置を目標位置まで調整する。

2.3 目標接近距離保持システム

Fig. 4 に示されるように目標捕捉システムから目標

Fig. 3 Target recognition algorithm.

Fig. 4 Target follow algorithm.

を確認, 捕捉し, ロボットの方向を調整した後, 測域センサから目標との距離を算出し, 事前に設定された距離まで接近する。なお, もし前進途中に目標が失われた場合には, 目標ロストの原因で距離計測プログラムが起動できないので, ロボットは停止する。

2.4 プラットフォーム自動バランスシステム

本研究では, 走行中機体の姿勢変化が影響されず, プラットフォームの水平位置を保持する姿勢制御器を導入している。故にプラットフォームの姿勢を制御する前に機体の安定な姿勢情報が必要である。安定な姿勢計測を行う為には, 現在の姿勢を計測し, 修正するシステムを構築する必要がある。姿勢の計測にはモーションセンサを用いる方法が一般的であるが, 6 軸モーションセンサから計測したデータにはいくつかの問題がある。

加速度センサは物体に作用するすべての直線的な力を[mV/g]の単位で測定する。動いている物体は, 常に作用する静的な力としての重力と合わせて, 加速度

Fig. 2 Proposed robot flowchart.

のような動的な運動を示すことがある。物体に加速度センサを取り付けることにより、物体に働く加速度と引力を測定できる。しかし、加速度センサは時間が経つと位置誤差を示す傾向がある。一方、ジャイロスコープは、物体に働く角速度の時間変化率[mv/deg/sec]の単位で示す。物体にジャイロスコープを取り付けることにより、センサは物体の角度変化をスムーズに測定するが、加速度センサと同じように、ジャイロスコープでも時間とともに徐々に角度誤差が増加する[1]。

加速度センサとジャイロセンサは、それぞれの特性によって、互いに補正することができる。補正方法として Madgwick Filter[2]を用いる。Madgwick Filter は S.O.H. Madgwick により提唱されたもので、アルゴリズムをクォータニオン (4 元数) ベースにすることで、補正精度の高いカルマンフィルタと同等の精度ながら、処理時間を大幅に短縮している。クォータニオンはベクトル(q_1)とスカラー(q_2, q_3, q_4)の 4 成分で 3 次元空間の回転を表現する。このときフレーム A に対するフレーム B の向きは、

$$\begin{aligned} {}^A_B\hat{q} &= [q_1, q_2, q_3, q_4] \\ &= [\cos \frac{\theta}{2}, -r_x \sin \frac{\theta}{2}, -r_y \sin \frac{\theta}{2}, -r_z \sin \frac{\theta}{2}] \end{aligned} \quad (1)$$

とし、またベクトル部の符号を反転した共役クォータニオンを

$${}^A_B\hat{q}^* = {}^B_A\hat{q} = [q_1, -q_2, -q_3, -q_4] \quad (2)$$

と表す。フレーム A からフレーム C への向きは、

$${}^A_C\hat{q} = {}^B_C\hat{q} \otimes {}^A_B\hat{q} \quad (3)$$

と表される。これがクォータニオンの基本表現となる。

続いて、Madgwick filter におけるクォータニオンの推定アルゴリズムを示す。始めにセンサフレームの角速度はクォータニオンを用いて、

$${}^S\omega = [0, \omega_x, \omega_y, \omega_z][rad/s] \quad (4)$$

と表される。また、アースフレームからセンサフレームへのクォータニオンによる回転の時間微分は以下のようになる。

$$\dot{{}^S_E\hat{q}} = \frac{1}{2} {}^S_E\hat{q} \otimes {}^S\omega \quad (5)$$

これは、離散時間では時刻 t における姿勢のクォータニオンを $\dot{{}^S_E\hat{q}}_{\omega,t}$ 、時刻 $t-1$ における姿勢の推定値を $\dot{{}^S_E\hat{q}}_{est,t-1}$ とすると、

$$\begin{cases} \dot{{}^S_E\hat{q}}_{\omega,t} = \frac{1}{2} {}^S_E\hat{q}_{est,t-1} \otimes {}^S\omega_t \\ \dot{{}^S_E\hat{q}}_{\omega,t} = \frac{1}{2} {}^S_E\hat{q}_{\omega,t} + \dot{{}^S_E\hat{q}}_{\omega,t} \Delta t \end{cases} \quad (6)$$

となる。

加速度センサの値は本来重力加速度と運動により発生する加速度を合わせたものとなるが、ここでは重力加速度のみを考える。この時、アースフレームでその真値が分かっているとすれば、センサフレームで計測される値をクォータニオンから推測でき、2 つのベクトルの差を求められる。その差分が最も小さくなる姿勢クォータニオン $\dot{{}^S_E\hat{q}}$ が最も適切な姿勢だと考えられる。

$$\min({}^S_E\hat{q} \in R^4) f({}^S_E\hat{q}, {}^E\hat{d}, {}^S\hat{s}) \quad (7)$$

$$f({}^S_E\hat{q}, {}^E\hat{d}, {}^S\hat{s}) = {}^S_E\hat{q}^* \otimes {}^E\hat{d} \otimes {}^S_E\hat{q} - {}^S\hat{s} \quad (8)$$

$${}^S_E\hat{q} = [q_1, q_2, q_3, q_4] \quad (9)$$

$${}^E\hat{d} = [0, d_x, d_y, d_z] \quad (10)$$

$${}^S\hat{s} = [0, s_x, s_y, s_z] \quad (11)$$

このとき通常はヘッセ行列により最適値を求めるが、計算負荷が増大するためここでは最急降下法を用いる。このときのアルゴリズムは以下のようになる。

$$\begin{aligned} {}^S_E\hat{q}_{k+1} &= {}^S_E\hat{q}_k - \\ &\mu \frac{\nabla f({}^S_E\hat{q}, {}^E\hat{d}, {}^S\hat{s})}{\|\nabla f({}^S_E\hat{q}, {}^E\hat{d}, {}^S\hat{s})\|}, \quad k = 0, 1, 2, \dots, n \end{aligned} \quad (12)$$

$$\nabla f({}^S_E\hat{q}, {}^E\hat{d}, {}^S\hat{s}) = J^T({}^S_E\hat{q}, {}^E\hat{d}) f({}^S_E\hat{q}, {}^E\hat{d}, {}^S\hat{s}) \quad (13)$$

$$\begin{aligned} f({}^S_E\hat{q}, {}^E\hat{d}, {}^S\hat{s}) &= \\ &\begin{bmatrix} 2d_x \left(\frac{1}{2} - q_3^2 - q_4^2 \right) + 2d_y(q_1q_4 + q_2q_3) \\ \quad + 2d_z(q_2q_4 - q_1q_3) - s_x \\ 2d_x(q_2q_3 - q_1q_4) + 2d_y \left(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_4^2 \right) \\ \quad + 2d_z(q_1q_2 + q_3q_4) - s_y \\ 2d_x(q_1q_3 + q_2q_4) + 2d_y(q_3q_4 - q_1q_2) \\ \quad + 2d_z \left(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_3^2 \right) - s_z \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

$$\begin{aligned} J^T({}^S_E\hat{q}, {}^E\hat{d}) &= \\ &\begin{bmatrix} 2d_yq_4 - 2d_zq_3 & 2d_yq_3 + 2d_zq_4 \\ -2d_xq_4 + 2d_zq_2 & 2d_xq_3 - 2d_yq_2 + 2d_zq_1 \\ 2d_zq_3 + 2d_yq_2 & 2d_xq_4 - 2d_yq_1 + 2d_zq_2 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & -4d_x q_3 2d_y q_2 - 2d_z q_1 \\ & \quad 2d_x q_2 + 2d_z q_4 \\ & 2d_x q_1 + 2d_y q_4 - 4d_z q_3 \\ & \left[\begin{array}{l} -4d_x q_4 + 2d_y q_1 + 2d_z q_2 \\ -2d_x q_1 - 4d_y q_4 + 2d_z q_3 \\ 2d_x q_2 + 2d_y q_3 \end{array} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

次に加速度センサの計測値を運動と重力加速度によるものとに分けて正規化し、

$${}^E \hat{g} = [0, 0, 0, 1] \quad (16)$$

$${}^E \hat{a} = [0, a_x, a_y, a_z] \quad (17)$$

とする。これを式(14), (15)に代入すると、以下が得られる。

$$f({}^E \hat{q}, {}^E \hat{a}) = \begin{bmatrix} 2(q_2 q_4 - q_1 q_3) - a_x \\ 2(q_1 q_2 + q_3 q_4) - a_y \\ 2\left(\frac{1}{2} - q_2^2 - q_3^2\right) - a_z \end{bmatrix} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} & f({}^E \hat{q}, {}^E \hat{a}) \\ & = \begin{bmatrix} 2q_3 & 2q_4 & -2q_1 & 2q_2 \\ 2q_2 & 2q_1 & 2q_4 & 2q_3 \\ 0 & 2q_2 & -4q_3 & 0 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

よって、更新式は、

$${}^E \hat{q}_{v,t} = {}^E \hat{q}_{est,t-1} - \mu_t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \quad (20)$$

となる。

ここで、 μ_t の最適値は不必要に大きなステップサイズに起因するオーバーシュートを回避するため ${}^E \hat{q}_{v,t}$ の収束率として定義できる。よって、 μ_t は以下の式で求められる。

$$\mu_t = \alpha \left\| {}^E \dot{\hat{q}}_{\omega,t} \right\| \Delta t, \quad \alpha > 1 \quad (21)$$

最後に上記の方法で加速度から計算した姿勢(${}^E \hat{q}_{v,t}$)と角速度から計算した姿勢(${}^E \hat{q}_{\omega,t}$)によるフィルタフュージョンのアルゴリズムを示す。

最終的な推定値を ${}^E \hat{q}_{est,t}$ とし、各姿勢クォータニオンの重みを γ_t として以下のように計算する。

$${}^E \hat{q}_{est,t} = \gamma_t {}^E \hat{q}_{v,t} + (1 - \gamma_t) {}^E \hat{q}_{\omega,t}, \quad 0 \leq \gamma_t \leq 1 \quad (22)$$

ここで、 γ_t の最適値は ${}^E \hat{q}_{\omega,t}$ の重みの発散が ${}^E \hat{q}_{v,t}$ の重みの収束に等しいことにより定義でき、

$$(1 - \gamma_t) \beta = \gamma_t \frac{\mu_t}{\Delta t} \quad (23)$$

$$\gamma_t = \frac{\beta}{\frac{\mu_t}{\Delta t} + \beta} \quad (24)$$

と表される。ここで、 $\frac{\mu_t}{\Delta t}$ は ${}^E \hat{q}_{v,t}$ の収束率であり、 β は ${}^E \hat{q}_{\omega,t}$ の発散率である。

また、 α が μ_t に対して非常に大きいと仮定すると、式(20)は、

$${}^E \hat{q}_{v,t} \approx -\mu_t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \quad (25)$$

と近似できる。同様に式(24)も

$$\gamma_t \approx \frac{\beta \Delta t}{\mu_t} \quad (26)$$

となり $\gamma_t \approx 0$ と近似できる。

ここで式(6), (25), (26)を式(22)に代入し、

$$\begin{aligned} {}^E \hat{q}_{est,t} &= \frac{\beta \Delta t}{\mu_t} (-\mu_t \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|}) \\ &+ (1 - 0)({}^E \hat{q}_{est,t-1} + {}^E \dot{\hat{q}}_{\omega,t} \Delta t) \end{aligned} \quad (27)$$

を得られる。この式は次式のように簡略化でき、フィルタ更新式が得られる。

$${}^E \hat{q}_{est,t} = {}^E \hat{q}_{est,t-1} + {}^E \dot{\hat{q}}_{est,t} \Delta t \quad (28)$$

このとき、

$${}^E \dot{\hat{q}}_{est,t} = {}^E \dot{\hat{q}}_{\omega,t} - \beta \dot{\hat{q}}_{\varepsilon,t} \quad (29)$$

$$\beta \dot{\hat{q}}_{\varepsilon,t} = \frac{\nabla f}{\|\nabla f\|} \quad (30)$$

である。Fig. 5はこのアルゴリズムのブロック図である。

6 軸モーションセンサから機体姿勢を得られた後、姿勢制御機はサーボモータ 2 つの 2 自由度系で機体姿勢変化に対応し、プラットフォームが常に平行を保つようになっている。その効果を Fig. 6 に示す。

Fig. 5 Block diagram of Madgwick filter.

(a) Without control (b) With control

Fig. 6 Attitude control effect.

Fig. 7 Color detection.

3 検証実験 1：自律追従システム検証実験

3.1 カメラ画像分析：色識別

本項ではカメラから特定色識別機能の検証を行う。識別率を保障するため、今回は検出しやすい黄色を選択する。実験方法はパネルの上で黄色テープを貼り付けてカメラに向けて左右に振り回し、太陽光の影響下での識別機能の有効性を検証する。

実験結果を Fig. 7 に示す。結果として、カメラは太陽光や周囲環境色に影響されず、パネルの上に貼り付けた黄色テープを識別し、カメラ画像でテープの重心（黒い点）を示した。以上、検証実験によって屋外で安定的に黄色識別が可能であることを確認した。

3.2 測域センサによる距離計測

廊下でロボット位置を固定し人はロボットに向けて接近、測域センサからロボットと人との距離計測を行う。実験結果を Fig. 8 に示す。画像の左は測域センサが検出した人の点群データ、上下の点群は廊下の壁、四角い枠内は人の点群データ、円の中心はロボットの中心位置を示している。右は測域センサから得られた距離データである。結果として測域センサで点群データより人とロボットの距離が計測可能であることを確認した。

3.3 自律追従システム検証実験

本項は 3.1 色識別システム及び 3.2 測域センサ距離

Fig. 8 Result of determined distance.

Fig. 9 Proposed robot system.

計測システムを統合し、色目標の方向検出機体方向調整システムと距離検出自動接近距離保持システムを組み合わせた自律追従システムの検証を行う。黄色テープを目標として識別成功すると機体方向調整し追従、目標を失う時に自動停止する。また、人との距離が一定値以下になる場合、ロボットは自動で後退する機能を検証する。

人の手で 3.1 の目標識別実験で目標と識別されたパネルを持ちロボットに搭載したカメラに向け、ロボットが目標を識別し、接近する途中パネルを一定時間隠した後、元の位置に戻す。設定された自動停止距離に到達後、人はパネルを持ってロボットに接近する。接近する途中もパネルを一定時間隠した後、元の位置に戻す。ロボットの前進・後退・回転速度は $0.3[\text{m/s}]$ とする。設定自動停止距離は $1.5[\text{m}]$ 、設定安全距離範囲は $0.9[\text{m}] \sim 1.5[\text{m}]$ とした。実験当時の画像を Fig. 9 に示す。

実験結果を Fig. 10 と Fig. 11 に示す。線はロボットと人との距離、灰色ブロックはロボットが停止している時間を示している。Fig. 10 に示すように設定された $1.5[\text{m}]$ の停止距離に到達したら、停止することが確認できた。また、目標距離が $0.9[\text{m}]$ 以下になるとロボットが自動で後退し、設定された $0.9[\text{m}]$ の距離を保持することが確認できた。

4 検証実験 2：プラットフォーム性能検証実験

屋外で典型的な地形や路面状況を選択し、プラットフォームを搭載したロボットを手動で走行させる。今

Fig. 10 Result of autonomous follow experiment.

Fig. 11 Result of autonomous back up experiment.

回選択された地形と走行状態は以下のようになる。

- i. 坂付きコンクリート地面坂走行
- ii. 舗装路面走行
- iii. 不整地走行：芝生
- iv. 不整地走行：砂利道

それぞれの走行状態において機体の ROLL, PITCH 角度と自動バランス機能を起動した後のプラットフォームの Roll, Pitch 角度を比較する。走行速度は, 0.4[m/s], 回転速度は 0.4[m/s]。コンクリート坂登り実験はロボットを坂の半ばに置いてロボットに坂を登らせ, また, 半ばに戻らせる。

不整地として芝生を対象とした 28 秒間の走行を行い, プラットフォームの自動バランス機能の検証を試みた。その結果, Fig. 12 と Fig. 13 に示されるように, 不整地の影響で機体の Pitch 角度が最大 23[deg]変化することに対して, プラットフォームが 5[deg]以内で収まること, また機体の Roll 角度が最大 20[deg]変化することに対して, プラットフォームが 7[deg]以内に収まることを確認した。また, 砂利道を対象とし, プラットフォームの自動バランス機能の検証を試みた。結果, 機体 Pitch 角度変化が最大 13[deg]変化することに対して, プラットフォームが 4[deg]以内で収まること, 機体の Roll 角度が最大 10[deg]変化することに対して, プラットフォームが 4[deg]以内に収まることを確認した。

整地としてコンクリート路面環境で坂登り, 坂下り走行状態において走行した結果, 機体の Pitch 角度変

Fig. 12 Result with pitch angle.

Fig. 13 Result with roll angle.

化が最大 18[deg]変化することに対して, プラットフォームが 5[deg]以内で収まること, また機体の Roll 角度は 2[deg]変化することに対して, プラットフォームが 1[deg]以内に収まることを確認した。

舗装路面に対し, 機体の Pitch 角度が最大 13[deg]変化することに対して, プラットフォームが 4[deg]以内で収まること, また機体の Roll 角度が最大 6[deg]変化することに対して, プラットフォームが 4[deg]以内に収まることを確認した。

以上の実験結果により, 今回提案する自動バランス (水平姿勢維持) システムは選定された屋外で典型的な地形では有効であることが検証された。

5 統合システム検証実験

本実験では前章までで紹介・検証を行ってきたプラットフォームの水平姿勢制御・色判別距離保持・自律追従各機能を統合し, 屋外環境で機能検証を行う。

今回はプラットフォームを搭載したロボットを実際の屋外環境において, 人の背中に貼り付けた黄色テープを認識し, 追従自律移動し, プラットフォームのバランス性能の最終検証実験を行う。

実験結果を Fig. 14, 実験当時の状況を Fig. 15 にそれぞれ示す。実験によりカメラは屋外環境において, 太陽光及びガラスの反射光に影響されず, 正確に人の背中に貼り付けた黄色テープを認識し, 人の後ろを追従することが確認できた。また, プラットフォームは人

Fig. 14 Result with platform performance in comprehensive test.

[3] Morgan QUIGLEY, Brian Gerkey, William D. Smart, Programming Robots with ROS, O'REILLY, 2017.

Fig. 15 Situation with comprehensive test.

6 結言

本研究は、自動バランスを行う荷台プラットフォームを有する自律移動ロボットを目指し、測域センサとカメラを組み合わせた自律移動機能と 6 軸モーションセンサに基づくプラットフォーム自動水平姿勢維持機能を構築した。その結果、ロボットが屋外不整地環境移動時においても、プラットフォームは路面角度に影響されず、水平を維持できることを確認し、提案システムの有効性を確認した。

謝辞

本研究の一部は、内閣府からの地方大学・地域産業創生交付金により支援を受けた。

参考文献

- [1] Bonnie Baker センサ融合を加速度センサやジャイロ스코ープに適用
<https://www.digikey.jp/ja/articles/techzone/2018/jan/apply-sensor-fusion-to-accelerometers-and-gyroscopes>
- [2] Sebastian Madgwick, An efficient orientation filter for inertial and inertial/magnetic sensor arrays, Report x-io and University of Bristol (UK), Volume 25, 2010.