

ピック&プレースを目的とした小型自律移動マニピュレータの開発

Development of a Small Autonomous Mobile Manipulator for Pick and Place

○正 井上 貴浩 (岡山県大) 学 小野 由美子 (岡山県大)

学 宮田 龍一 (岡山県大) 正 平井 慎一 (立命館大)

Takahiro INOUE, Okayama Prefectural Univ., inoue@ss.oka-pu.ac.jp

Yumiko ONO, Okayama Prefectural Univ.

Ryuichi MIYATA, Okayama Prefectural Univ.

Shinichi HIRAI, Ritsumeikan Univ., hirai@se.ritsume.ac.jp

This paper newly develops a small autonomous mobile manipulator that consists of a three-joint manipulator and four-wheeled omni-directional drive mechanisms. The manipulator enables to position control on the three dimensional space, and the mobile platform can move remaining its orientation straight and diagonal towards traveling direction, which can be realized by two-wheel drive or four-wheel drive. In this paper, we propose a simple and novel traveling control method so that the mobile robot is able to travel in a straight line on flat ground. This control strategy is based on the integral computation of a gyro sensor to modify the orientation of the robot during the traveling. In addition, we achieve that the mobile robot can climb on a slope of 20° inclined angle by changing the speed distribution between the four wheels. Finally, this paper concludes that the small autonomous mobile robot embedded with a three-joint manipulator can travel stably on irregular terrains.

Key Words: Gyro sensor, Drift, Climbing, Four-wheeled, Omni-directional

1 緒言

食品加工工場や弁当などの製造工場においては、食品や食材の調理鍋への投入やグルメカップへの盛り付け・パック詰め作業を手作業で行っているが、それは所狭しと並ぶ調理機器の存在やそれらによる非直線的な経路に因るところが大きい。加えて、厨房のように排水溝が部分的あるいは直線的に長く設置されていることから、床面にわずかな角度の傾斜が設けられている。このような環境で上記作業を自動化するためには、旋回が可能で傾斜面においても安定走行できる自律移動ロボットが必要となる。そのようなことから、本研究では3関節を有するマニピュレータを搭載可能で、かつ全方向への移動能力を持つオムニホイールを用いた小型自律移動ロボットを開発する。本稿はその第1報として、DCモータに直結された4つのホイールを対向位置に配した移動台車ロボットを設計開発し、基礎走行実験を行う。また、今後の自動化工程への導入を想定して、坂道を登坂可能な駆動能力が必要となる。したがって、本稿で製作する自律移動台車による直進安定性の検証に加えて、整地および不整地での滑らかな登坂走行を実現するために、ジャイロセンサを用いた安定走行制御手法を提案する。

2 4輪型全方向自律移動台車の機構と制御

Fig. 1-(a)のように、本稿で設計開発した自律移動台車は「オムニホイール」を対向位置に4輪を備えており、Fig. 1-(b)(c)のような直流モータの配置となる。また、3次元空間での手先位置決め制御が可能な3関節機構を有するマニピュレータが搭載されている。モータとホイール間のシャフトは両持ちの支持とし、自重に起因するラジアル荷重に対するホイールの上下方向へのずれをベアリングにより抑止している。次に、これらの駆動系は厚み5mmの亚克力板(320mm×320mm)に取り付けられており、その上部にマイコンやモータドライバ回路等を配置している。また、自律移動を目的としているため、ジャイロセンサと加速度センサを最上部に搭載している。本移動台車ロボットの総重量は2220gとなっている。本稿の実験では、Fig. 1-(d)のような約 18° の坂路をロボットが斜め姿勢を維持しながら4輪駆動により進む試行を行う。滑り易い床面においては姿勢を崩すことが頻繁に起こり得る。このとき、ジャイロセンサにより取得される

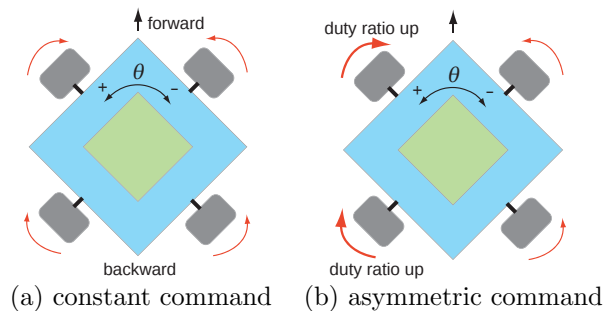


Fig.3 A schematic view of the robot indicates normal climbing and controlled climbing by using gyro sensor.

ヨー角をリアルタイムで求め移動台車の姿勢ずれを検知することで、坂道においても直線的な登坂が可能な走行手法を提案し、動作検証を行う。

3 ジャイロセンサによる直進走行制御

本章では、ジャイロセンサを用いた直進走行の性能を評価する。実験で利用するジャイロセンサや直流モータ、及びモータドライバ等をTable 1に示す。まず、直流モータの駆動は速度制御用ICによるPWM制御とし、duty比により線形的に速度変化が可能である。また、速度指令において速度分解能は10bitとなる。モータのギヤ比は62:1であり、ロータリエンコーダの分解能は2048 pulse/rotとなる。さらに、ジャイロセンサのデータ取得はマイコンをマスタとするIIC(I2C)通信で行っており、クロック信号が480 kHzで動作している。また、ジャイロセンサではわずかながら直流成分が出力されるためロボットの姿勢を積分計算によって求める場合ドリフトが発生する。このドリフト成分を除去するために、次章で述べるドリフト補正を行い直進性能を評価する。本実験では幅1.62mの通路を走行させ(Fig. 2-(a))、ジャイロセンサによる姿勢情報をフィードバックしロボットの走行中の向きを 0° に維持したま走行が可能かを検証する。このと

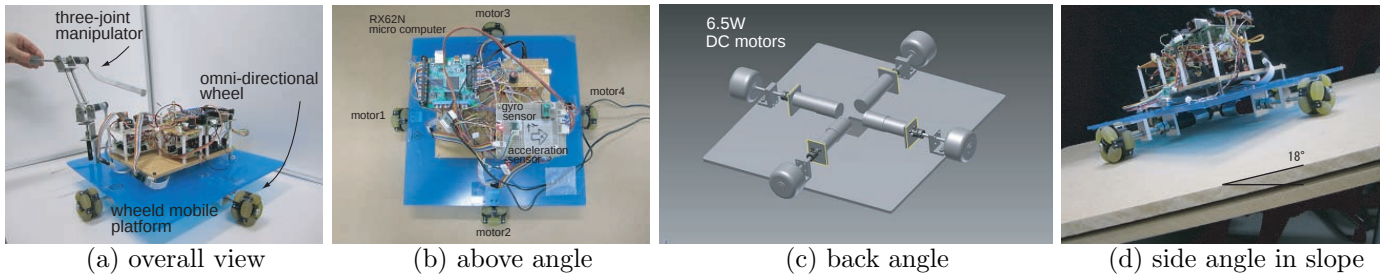


Fig.1 An omni-directional four-wheel mobile platform developed in this paper.

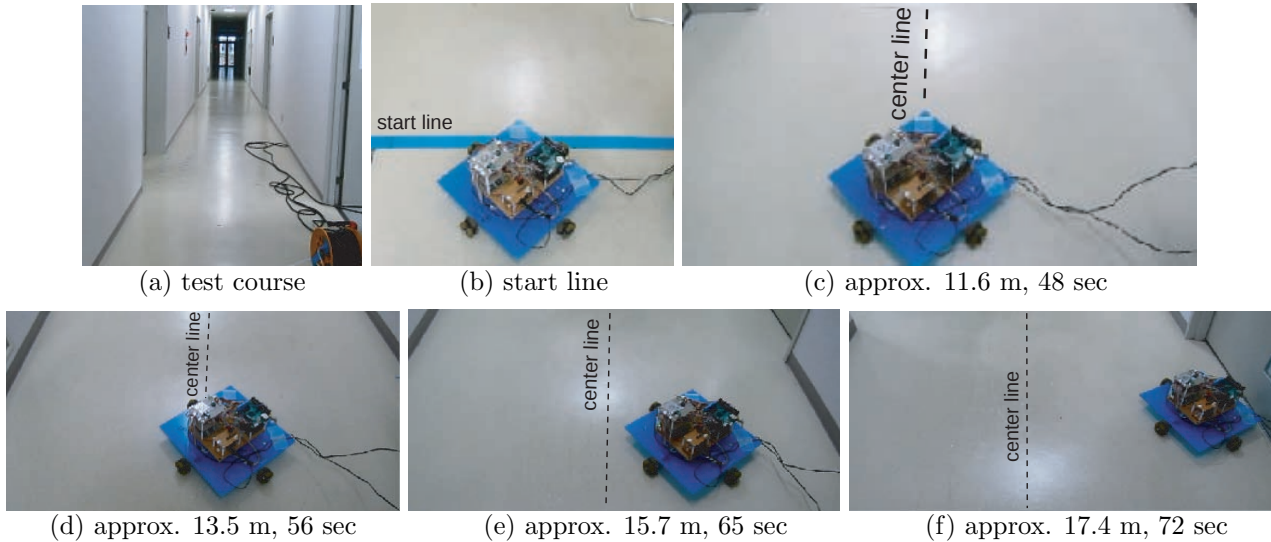


Fig.2 It shows several snapshots of the experiment of straight driving and its course.

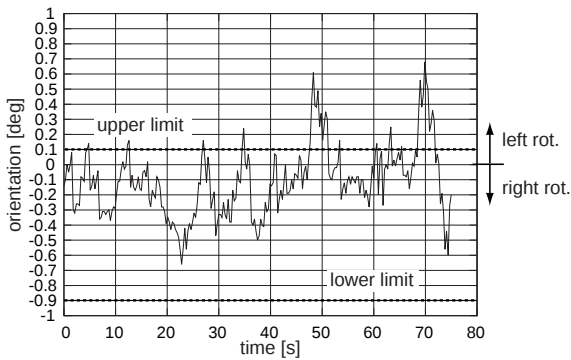


Fig.4 Experimental result of straight driving.

きの姿勢制御アルゴリズムは以下の通りである。

Fig. 3 のように、走行中の姿勢角 θ のずれをジャイロセンサの角速度から算出し、姿勢のずれを解消する方向の 2 輪の duty 比を増加させる。これを走行中繰り返すことで、正負の姿勢のずれが生じても安定的な直進走行を実現する。本実験では、まず duty 比を 80% に設定し通路中央に配置し走行を開始する (Fig. 2-(b))。走行中のロボットの姿勢角が $\theta > 0.1^\circ$ 、 $\theta < -0.9^\circ$ を満たすとき、Fig. 3 のように姿勢を戻す側の 2 輪の duty 比を 15% に増加させる。なお、制御周期は 50ms としている。実験結果を Fig. 2-(c), (d), (e), (f) と Fig. 4 に示す。この結果、ロボットは約 18 m の位置で右側の壁と接触し停止した。走行途中においては、約 13 m 付近まで安定的な直進走行を実現することができている。ジャイロセンサを利用しない予備実験では約 5 m の距離で左側の壁と接触し停止していることから、直進安定性が格段に向上したと

Table 1 Robot parts list and specifications

parts	product	manufacturer
Micro controller	RX62N (96MHz)	Renesas
DC motor	RE-max24 (6.5W)	Maxon motor
motor driver	TB6612 (3.2A pk.)	Toshiba
Omni wheel	TD-48	Tosa Denshi
Gyro sensor	LSM9DS0 (IIC)	ST micro
Accel. sensor	KXR94-2050	Kionix

言える。以上の走行結果を時間軸で図示すると Fig. 4 となるが、旋回上限となる 0.1° を超えたところでモータ速度が増加しロボットの姿勢を元に戻していることが見て取れる。一方で、ロボットの姿勢は速度配分が切り替わる下限には到達しておらず、左に旋回しやすい特徴を有することになる。また、Fig. 2 から分かるように、13 m 程度走行したのちに進路が急激に右に逸れているが、この原因は現在不明であり今後の検討課題である。

4 整地における登坂制御

4.1 ジャイロセンサのドリフト補正

走行実験の前に予めジャイロセンサにより得られる角速度の積分により生じるドリフトを補正する。移動ロボットを静止したまま一定時間計測した角速度を積分した結果が Fig. 5-(a) である。ロボットの進行方向から反時計回りを正回転、時計回りを負回転とすると、結果から分かるように時間に対して負の方向に線形的に増加するドリフト特性を示す。したがって、本稿では実験経過時刻ごとのドリフト量を出力値に足し合わせる最も簡易な補正処理を行う。その結果が Fig. 5-(b) となる。わずかにドリフト量が残っているが 10s で 0.3° 以内に収まっており、走行実験におい

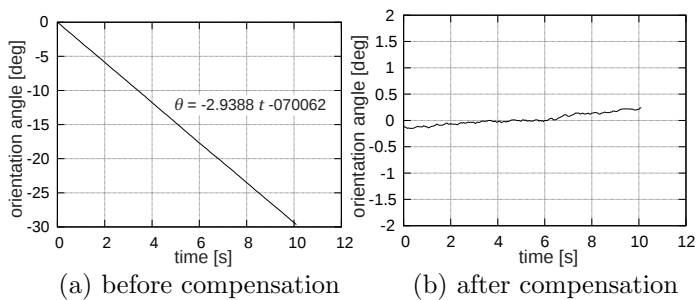


Fig.5 Drift compensation of angular velocity measured from a gyro sensor.

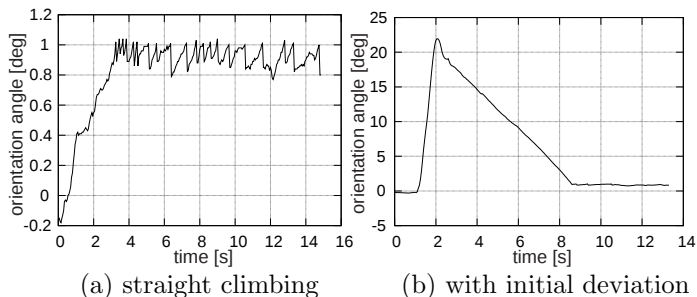


Fig.7 Experimental results of climbing control.

て支障がないと判断されるため、本手法を採用する。

4.2 一定速度指令による登坂走行

本稿では、坂路として木材合板（厚み 9mm のラワンベニヤ）を 2 枚重ね設置し、ロボットの移動距離を 550mm、傾斜角を 18° に設定する。実験環境の一部は Fig. 1-(d) に示している。本節ではまず、速度指令として duty 比を 20%, 40%, 60% とし登坂動作を確認する。ここでは、Fig. 3-(a) のように、4 輪すべてで同一の duty 比を入力している。登坂時のロボットの姿勢変化を図示すると Fig. 6 となる。進行方向（登り）に向かって一定割合で反時計周りにずれを生じていることが分かる。duty 比の上昇に伴って移動速度も上がることから登坂時間は短くなるが、時間に対する姿勢変化率はおおむね等しい傾向が見られる。

4.3 ジャイロセンサによる姿勢制御

前節での基礎実験では、直流モータの個体差や 4 輪の配置誤差等によりロボットの姿勢が反時計周りにずれることが分かった。そのようなことから、坂路での姿勢維持を実現するためにジャイロセンサにより計算される姿勢角をフィードバックし、直線的な登坂制御を行う。アルゴリズムは以下の通りである。

まず、duty 比を Fig. 6-(a) と同様に 20% に設定し登坂を開始する。走行中のロボットの姿勢角が $\pm 1^\circ$ を超えたときに、Fig. 3-(b) のように姿勢を戻す側の 2 輪の duty 比を 30% に増加させる。なお、制御周期は 50ms としている。Fig. 7-(a) から分かるように、 1° を維持できていることが確認できる。次の実験として、スタート後すぐにロボットを持ち上げ姿勢に 20° 以上の大きな外乱を与える。このような状況においても上記アルゴリズムにより坂路後半において 1° の姿勢に収束していることが確認できる。これらの結果は、移動台車の構造的マージンやモータ個体差等の潜在的誤差をジャイロセンサによりキャンセルできるというセンサベース制御が可能であることを示唆する。また、路面が湾曲するような環境においてホイールに滑りや空転が生じたとしても同様の効果が予想される。

5 不整地における登坂制御

本章では、ジャイロセンサによる同様の登坂制御アルゴリズムを用いて、傾斜角が 20° となる縞鋼板（不整地）上を走行する実

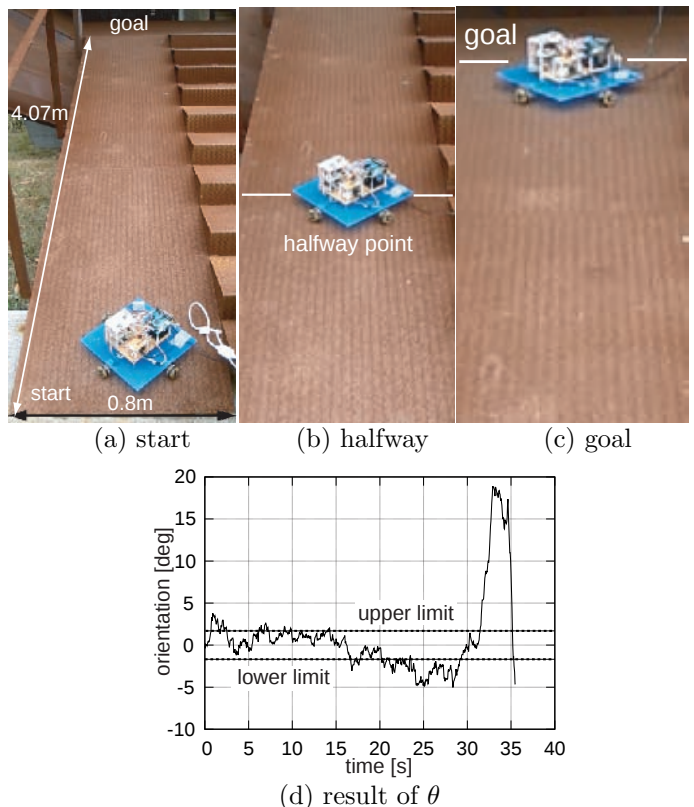


Fig.8 It shows a climbing process of the robot, in which the initial duty ratio and the increase algorithm of speed are decided as 60 % and 10 %, respectively.

験を行う。ここでは、モータの速度配分を切り替える閾値を上下限で $\pm 2^\circ$ とし、以下の 2 通りの実験を行う。

- ex. 1 初期 duty 比を 60 % に設定し、姿勢維持のための速度配分は 10 % 増加
- ex. 2 初期 duty 比を 80 % に設定し、姿勢維持のための速度配分は 15 % 増加

まず、ex. 1 の実験結果を Fig. 8 に示す。スタート地点から中間地点を通してゴールまで姿勢を崩さずに走行していることが分かる。制御性能については (d) 図からも分かるように、 $\pm 2^\circ$ に収まるように上記アルゴリズムがうまく機能している。整地での直進走行と異なる点は姿勢のずれが顕著に大きいことであり、Fig. 4 と比較すると不整地走行においては上下限の両姿勢に到達していることが分かる。同様に、Fig. 7 の整地登坂走行と比較しても同じ考察が得られる。ロボット姿勢に関するこの差異は、坂路となる縞鋼板の凹凸が原因と考えられる。また、ゴール直前において姿勢が大きく崩れているが、速度配分アルゴリズムにより姿勢を戻している。

次に、ex. 2 の実験結果を Fig. 9 に示す。ここでは、ベースとなる初期の duty 比が大きいためゴールに到達するまでの時間が短くなっている。姿勢に関しては同様の速度配分アルゴリズムにより $\pm 2^\circ$ 以内に収まっていることが分かる。しかし、中間地点において左側に寄っており、ゴール地点では最も左側にまでずれを生じている。これは、duty 比が高いために走行速度が全体的に速くなり、姿勢維持のための速度調整効果が小さくなっているためであると考えられる。この結果を図示した (d) 図において比較的大きく姿勢が崩れていることからそのような結論に達する。このような結果に基づいて、今後は横方向へのずれを抑止するため加速度センサによるフィードバックを導入する予定である。

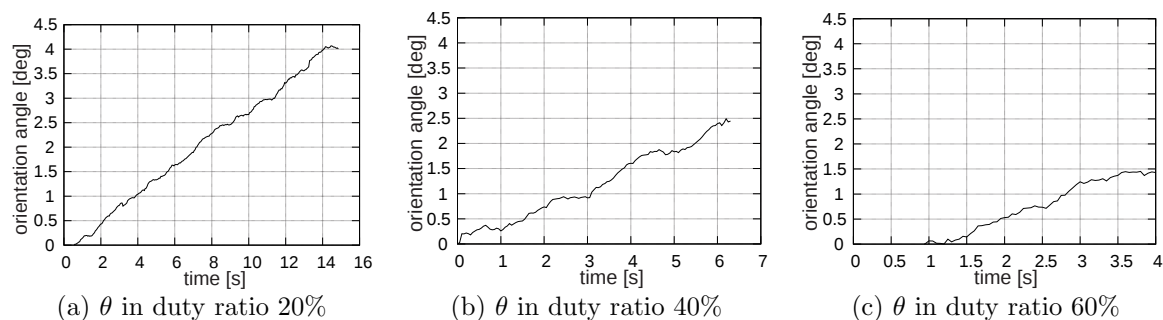


Fig.6 Experimental results of the robot orientation in climbing, which is obtained under constant velocity command by PWM pulse.

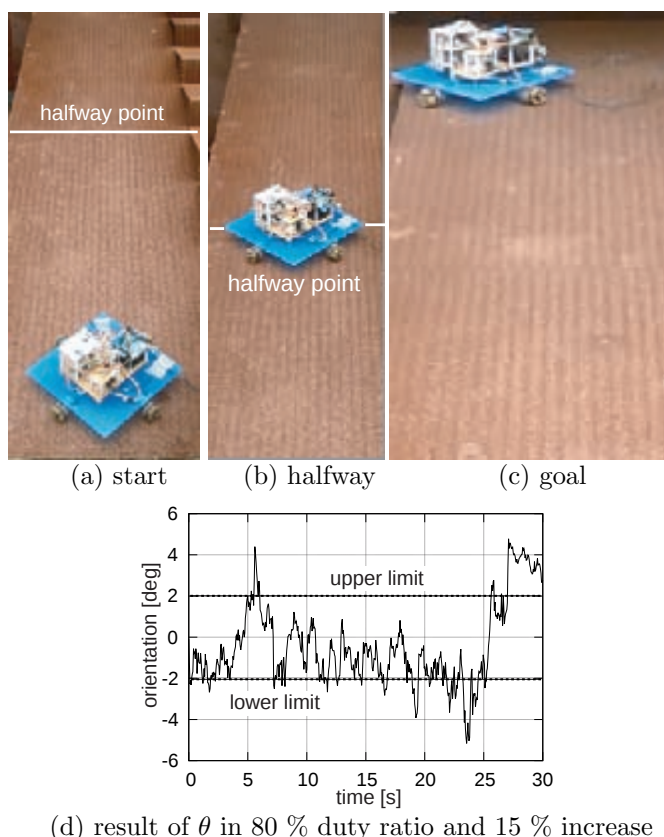


Fig.9 It shows a climbing process of the robot, in which the initial duty ratio and the increase algorithm of speed are decided as 80 % and 15 %, respectively.

6 結言

本研究では3関節を有するマニピュレータを搭載可能で、かつ全方向への移動能力を持つオムニホイールを用いた小型自律移動ロボットを開発した。本稿はその第1報であり、機構においてはDCモータに直結された4つのホイールを対向位置に配しており、自律移動型の台車ロボットとして基礎走行実験を行い動作確認を行った。実験においてはまず、ジャイロセンサによる角速度を積分することで台車ロボットの姿勢をリアルタイムで取得し、制御系にフィードバックすることで姿勢を維持したまま約18m直進させることに成功した。また、同様の速度配分アルゴリズムにより20°の傾斜となる登坂走行においても安定的な走行を実現でき、幅約0.8m、距離約4mの狭隘な坂路を踏破することができた。今後は、開発したマニピュレータを台車ロボットに実際に搭載し、物体把持のための移動計画手法を提案していく予

定である[1-7]。

謝 辞

本研究の一部は、公益財団法人JKAの補助事業(26-144)及び本学教育力向上支援事業の補助を受けて行われたものである。

References

- [1] Seraji, H., "An on-line approach to coordinated mobility and manipulation", IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, Vol.1, pp.28-35, 1993.
- [2] Harada, K., Foissotte, T., Tsuji, T., Nagata, K., Yamanobe, N., Nakamura, A., and Kawai, Y., "Pick and place planning for dual-arm manipulators", IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.2281-2286, 2012.
- [3] Yunyi Jia, Ning Xi, and Nieves, E., "Coordination of a non-holonomic mobile platform and an on-board manipulator", IEEE Int. Conf. Robotics and Automation, pp.4356-4361, 2014.
- [4] Chanhun Park, Dongil Park, GwangJo Jung, Doohyung Kim, KyungTaik Park, Chulhun Park, and Taeyong Choi, "A robot manipulator on the mobile platform for an off-road environment", 14th Int. Conf. Control, Automation and Systems (ICCAS), pp.322-325, 2014.
- [5] Filipescu, A., Filipescu, S., and Minca, E., "Hybrid system control of an assembly/disassembly mechatronic line using robotic manipulator mounted on mobile platform", 7th Int. Conf. Industrial Electronics and Applications (ICIEA), pp.447-452, 2012.
- [6] Filipescu, A., Petrea, G., Filipescu, A., and Filipescu, S., "Modeling and control of a mechatronics system served by a mobile platform equipped with manipulator", 33th Chinese Control Conf. (CCC), pp.6577-6582, 2014.
- [7] Mostafa, S.N., Mostafa, G., and Masoud, M., "Optimal trajectory planning of a mobile robot with spatial manipulator for obstacle avoidance", Int. Conf. Control, Automation and Systems (ICCAS), pp.314-318, 2010.