

高精度と高い汎用性を併せ持つ 小型モバイルマニピュレータの実現

横浜国立大学 大学院工学研究院 機械・材料・海洋系工学専攻／先進実践学環, 応用 AI

淵脇 大海

1. はじめに

高い汎用性を持つロボット技術は工業だけでなく食品・農業等の多分野へ応用され、人手作業の代替が進んでいる。もしも世界中の機器の隙間に「超小型で高性能なロボット」を簡単に設置して新機能を付与できれば、ニーズに応じて機能を自由にカスタマイズできるようになるため、様々な機器の稼働率・応用範囲を大幅に拡大できる。つまり省資源/再利用/SDG's(持続可能な開発目標)へ大きく貢献できる。そのためにはロボット技術の小型化が必要である。

ロボット技術の位置決め精度は、水平多関節型ロボットアームによる $10\ \mu\text{m}$ 程が限界であり、 $10\ \mu\text{m}$ 以下の精度の精密作業は多軸直動ステージにより実施される。多関節ロボットアームの位置決め誤差と作業範囲はアーム長に比例するため、作業範囲と小型化・高精度化はトレードオフの関係にある。直動ステージにより運搬して作業範囲を広げる場合は装置の大型化を招き、車輪型自走ロボットにより運搬する場合は精度に課題が残る。

以上より「小型化」、「広い作業範囲」、「 $10\ \mu\text{m}$ 以下の高精度化」の同時実現がロボット技術の次の課題の一つとして挙げられる。

本研究では「高精度と高い汎用性を併せ持つ小型モバイルマニピュレータ」により課題の解決を試みる。

2. ホロノミック精密自走機構

本研究で開発されたホロノミック精密自走機構の外観図を図 1 に、諸元を表 1 に示す。本自走機構は先行研究[3]にて開発された機構を軽量化、低重心化したロボットであり先行研究に比べ、最大歩行速度は約 2 倍となっている。

本ロボットは 4 つの積層型圧電素子からなる $XY\theta$ ステージ、アルミ合金製の内脚及び外脚、内脚と $XY\theta$ ステージに接続される 4 つの Z 軸圧電アクチュエータから構成され、X、Y、 θ の三自由度を持つ精密位置決め機構である。また、歩行動作は $XY\theta$ ステージによる脚の相対位置の変化及び、Z 軸アクチュエータによる接地脚の切り替え動作により行われる。

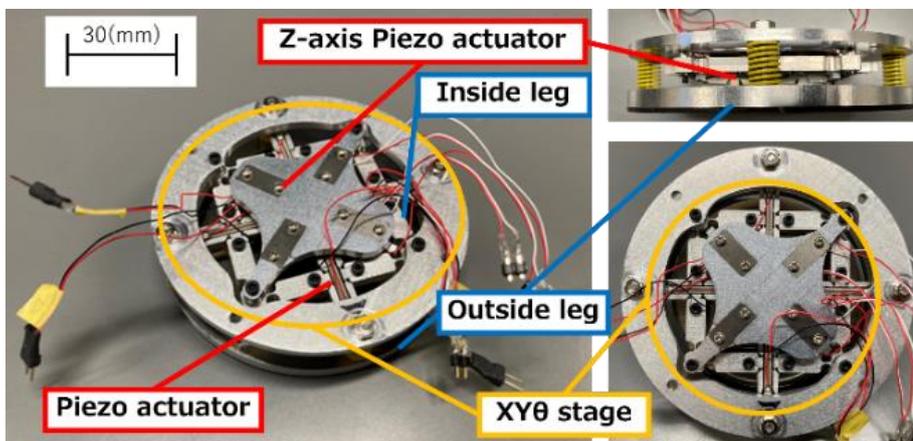


図 1 開発された自走機構の写真

表 1 自走機構の主な性能

サイズ [mm]	90×120×140 [mm]
質量 [g]	610 [g]
歩行速度(歩行周波数)	2.32[mm/s] (20[Hz])
無線駆動時間	60 [分]

3. 独立駆動システムの構成

本システムは主に“無線駆動システム”及び“自動作業システム”の二つに分類される。図 2 には本研究にて開発された無線駆動システムの概要図を示す。本システムは給電回路、圧電ドライバ PDu100、制御用コンピューター Raspberry Pi、波形生成システム、モータドライバから構成される。Raspberry Pi は Wi-fi 通信で、任意の端末から遠隔操作が出来、無線での運用が可能である。また、自動作業システムの概要図を図 3 に示す。本システムは画像解析を行う解析用コンピューター (Raspberry Pi) 及びロボット搭載の小型カメラより構成される。Python による強化学習を用いた自動ピック&プレース作業のプログラムを実装している [7]。

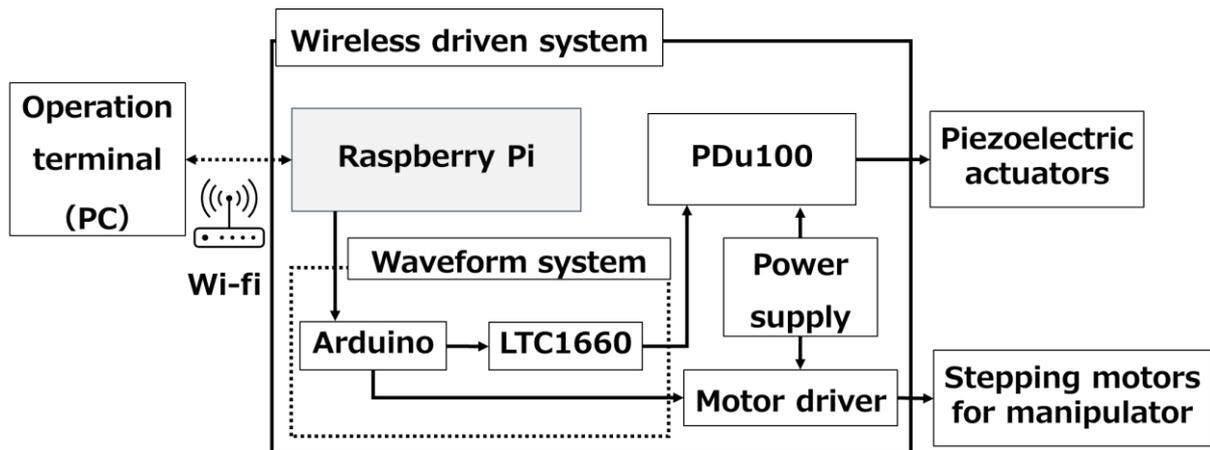


図 2 無線自走ロボットのシステム構成

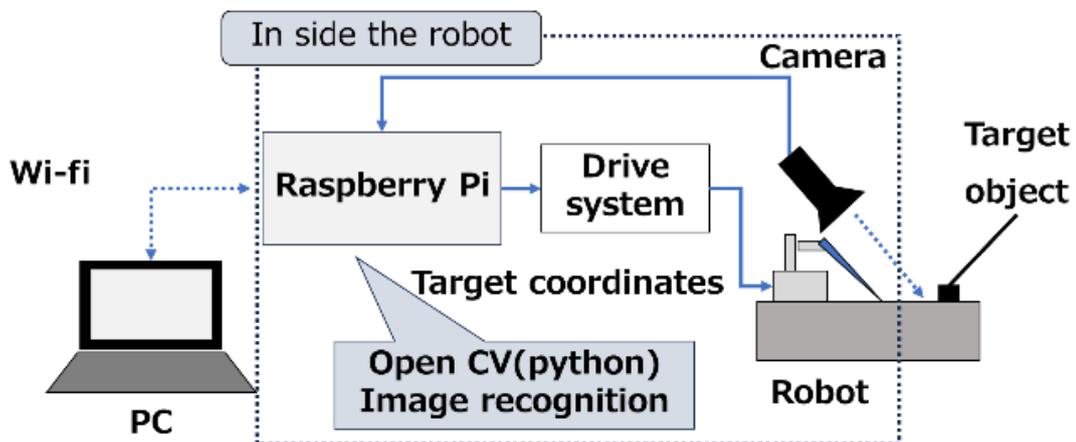


図 3 微小物のピック&プレース作業の自動制御システムの構成

4. 独立駆動型ホロミック精密自走ロボット

独立駆動型ホロミック精密自走ロボットの概観図を図4に、諸元を表1に示す[5, 6, 8]. 本ロボットは自走機構, ステッピングモータ駆動型マニピュレータ, 独立駆動システムにより構成される. マニピュレータを用途に応じた小型作業ツールに換装する事で, 様々な作業の自動化を実現できる[3, 8].

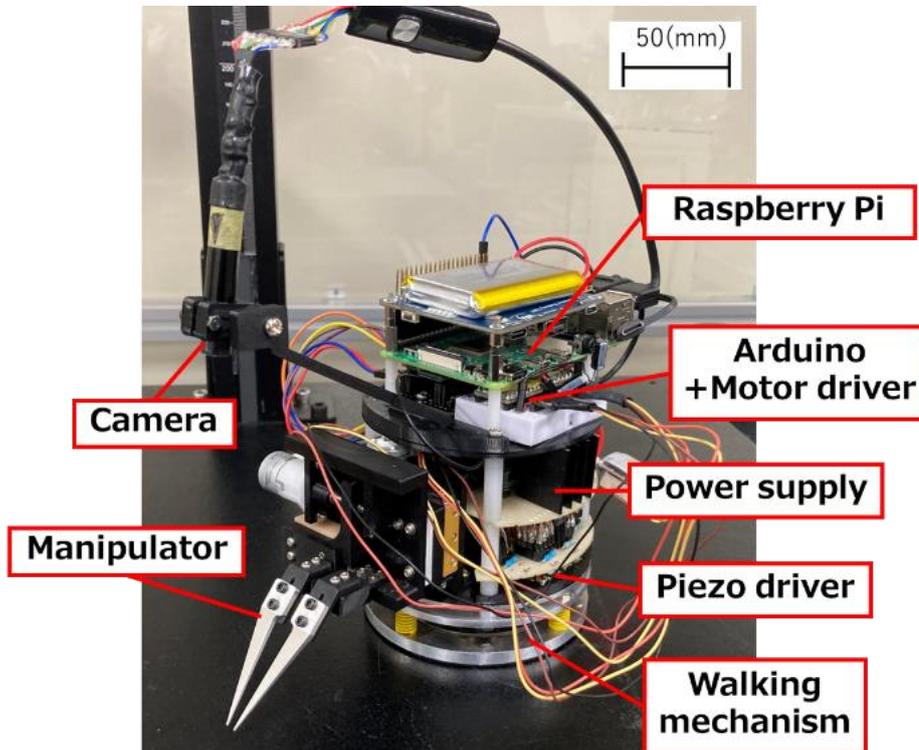


図4 世界初の自律型ホロミック精密作業ロボットの写真

5. 性能評価実験

無線駆動システムによる自走ロボット動作の定量的評価のため, 駆動周波数 1[Hz], 10[Hz], 20[Hz]の各条件で5回, 並進動作, 自転動作で5周期の歩行計測を行った.

図5に10[Hz]での並進動作の八方向のXY平面での軌跡のプロットを示す. 10[Hz]の駆動周波数では, 八方向の平均経路長±標準偏差は $505.6 \pm 5.2 [\mu\text{m}]$, 変動係数は 1.9[%]以内であり, 方位角度の誤差も 1.5度以内となった. また, 自転動作では平均回転角±標準偏差は $1.17 \pm 0.039 [\text{deg}]$, 変動係数は 1.3[%]と, 並進, 自転動作ともに十分な再現性を持つ結果となった. 加えて, 歩行時に生じた揺動はXYθステージを駆動する圧電アクチュエータのヒステリシス, 及び機体高の高さが原因であると考察される.

このロボットの高精度化のためには, 機構改良による振動の低減に加え, 自走ロボットに搭載できる薄型のXYθ変位センサの開発と精密軌道制御の研究を進めている[1, 2, 4].

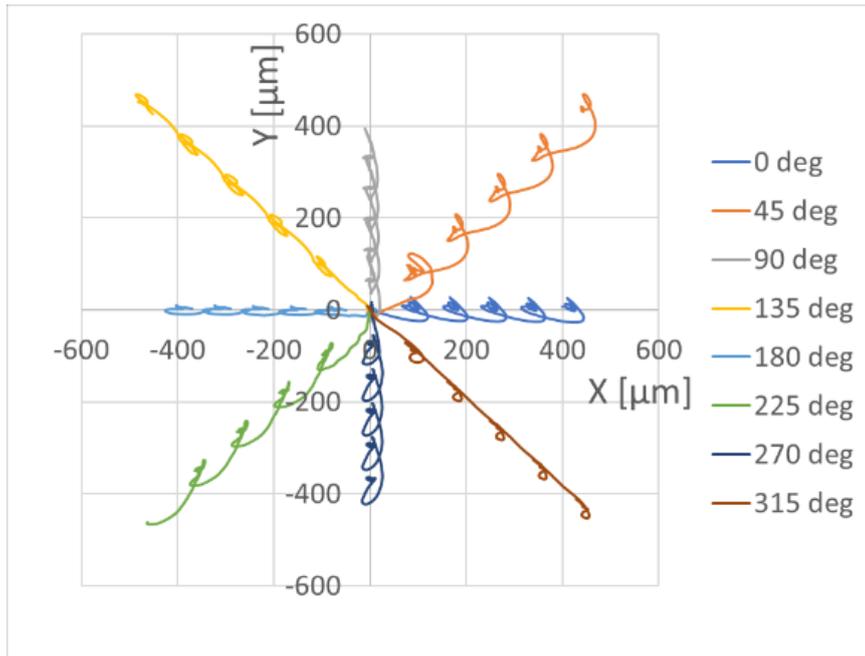


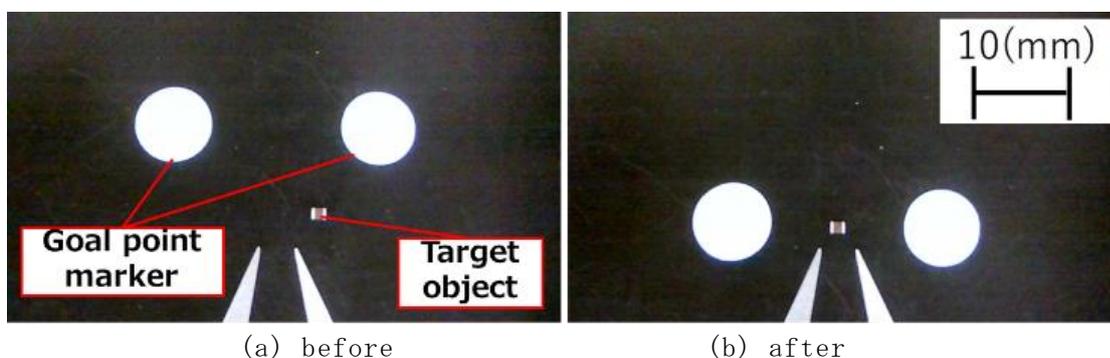
図5 8方向の並進動作のXY平面上の軌道(駆動周波数10Hz)

6. 自動ピックアンドプレース実験

自走ロボットによる自動ピックアンドプレース実験を行った。自走ロボットの駆動周波数は10[Hz]、把持対象物にチップコンデンサ(3.2×2.5×2.2[mm])、プレース目標地点としてマーカーを用意し、2つのマーカーの中央に対象物を自動でピックアンドプレースする作業を3通りの配置で計15回繰り返した。図6には自動ピックアンドプレース時の様子を、図7には目標プレース位置に対する配置結果をXY平面にプロットしたグラフ(左図)及び各フェーズにおける作業時間の円グラフを示す。

位置決め誤差の平均±標準偏差は 1.4 ± 0.8 [mm]、平均作業時間は552[s]となり、精度、作業時間ともに今後の改良が必要な結果となった。対象物の認識に多く時間を要していることから、搭載コンピューターの処理性能が原因であると考えられる。また+X、+Y方向に大きく生じる系統誤差が生じた。原因はプレースダウン時のピンセット部への対象物の静電気力による張り付きが考えられる[5]。

作業の高速化や高精度化に改善の余地があるものの、ホロノミック精密自走ロボットによるワイヤレス駆動による自動ピック&プレース作業を世界初で実現することができた。2024年4月28日に放送予定のBSフジのガリレオXで最新成果が放映される予定である[8]。



(a) before (b) after
図6 チップコンデンサの自動ピック&プレース実験

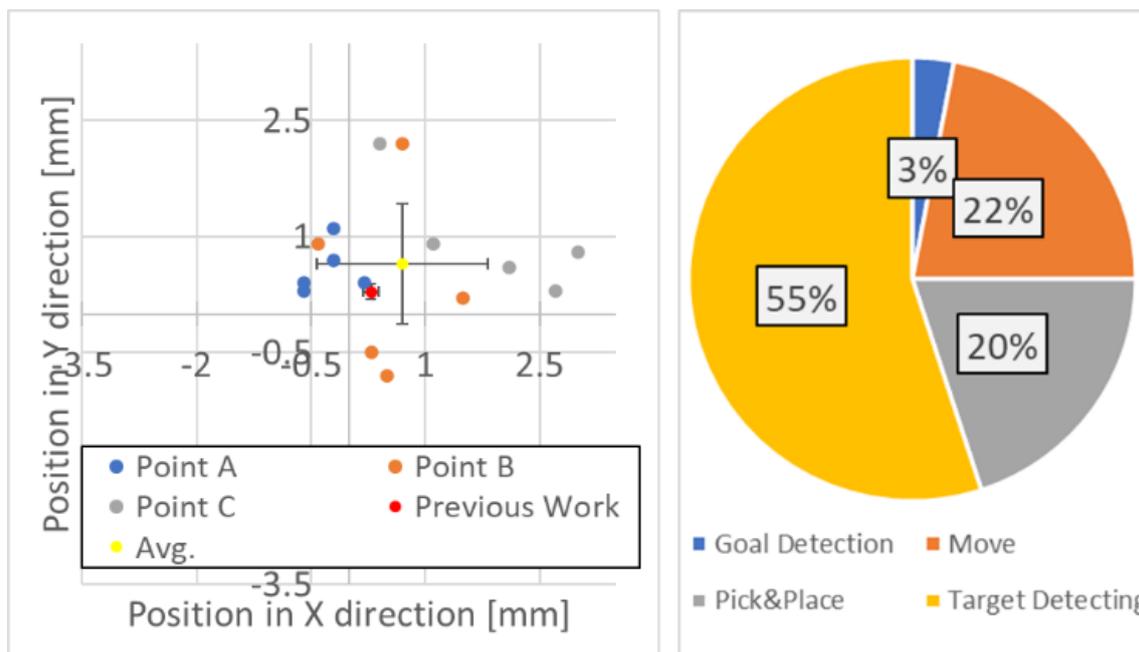


図7 位置決め誤差の分布（左）と作業時間の内訳（右）

7. 結論と今後の展望

本研究ではロボット単体で微小物のマニピュレーションが可能な独立駆動型ホロノミック精密自走ロボットの開発及び、自動ピックアンドプレースの実現を行った。機体は従来よりも18[%]程軽量化され、マニピュレーター、画像認識を行うコンピューターを搭載し、チップコンデンサの自動ピックアンドプレースを実現した。

今後の課題は、ソフト、ハードウェアの改良による自動作業の時間短縮と高精度化、複数台の自走ロボットによる協調作業システムの構築によるフレキシブルかつ多様な作業の自動化により有用性を示すことなどが挙げられる。

謝辞

本研究を遂行するにあたり、天野工業技術研究所様の貴重な助成金を賜り、多大なご支援を頂きました。研究室一同謝意を示します。

参考文献

- [1] 塩田, 潤脇 他, 4つのエンコーダにより構成されるXY θ 変位センサの校正, 精密工学会秋季大会, pp. 199-200, 9/13-15, 福岡工業大学
- [2] 楠井, 潤脇 他, P制御による昇降足式ホロノミック自走ロボットの3軸精密位置決め, 精密工学会秋季大会, pp. 199-200, 9/13-15, 福岡工業大学
- [3] M. Suzuki, O. Fuchiwaki et al., Autonomous Holonomic Mobile Micromanipulator for sub-mm Objects Inspired by the Rhinoceros Beetle, Adv. Int. Sys., **IF 7.4**
- [4] O. Fuchiwaki, M. Shiota, E. Kusui, Y. Tsukui, C. Sekine, and R. Kinoshita, XY θ displacement sensor by four encoders for wide and precise measuring of holonomic robot, Proc. of the 10th International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2023), oral presentation on 24th Nov. 2023, HK Polytech
- [5] R. Kinoshita, E. Kusui, H. Kusama, Y. Tsukui, R. Minegishi, Y. Sugiyama, Y. Sunohara, C. Sekine, and O. Fuchiwaki, A Piezoelectric Stick-slip Manipulator for a Holonomic Precision Mobile Robot, Proc. of the 10th

- International Conference of Asian Society for Precision Engineering and Nanotechnology (ASPEN 2023), oral presentation on 23rd Nov. 2023, HK Polytech
- [6] 杉山結菜, 瀏脇大海, 2軸マニピュレータの開発とグリップ把持力制御の評価, 第31回精密工学会 学生会員卒業研究発表講演会論文集, I05, pp9-10, 東京大学, 3月12日, 2024
 - [7] 関根千裕, 瀏脇大海, 強化学習を用いた小型ホロミック自走ロボットの経路計画, 第31回精密工学会 学生会員卒業研究発表講演会論文集, J01, pp41-42, 東京大学, 3月12日, 2024
 - [8] 西村祐子, 瀏脇大海, 振動ピペット2本による流れを利用した異形微小物の液中マニピュレーション法の探索, 第31回精密工学会 学生会員卒業研究発表講演会論文集, I19, pp27-28, 東京大学, 3月12日, 2024
 - [9] 小さなロボットが拓く世界 極小ロボットが秘める可能性, ② 小さなものを扱うための小型ロボット(仮), BSフジ, ガリレオX, 4月28日, 日曜日, 朝8時28分~9時00分, テレビ放送決定