

水平形パラレルメカニズム収穫ロボットの開発

システム工学群

機械・航空システム制御研究室 1220026 上野 勇希

1. 緒言

近年、高齢化や農業従事者の不足により農業人口の減少が問題となっているため、農作業の自動化や効率化を目指したロボットの研究が期待されている。農作物を対象とした収穫の事例として円筒座標系型、垂直多関節型などのマニピュレータが研究・開発されている⁽¹⁾⁽²⁾。これらを採用したロボットはリンク上にアクチュエータを配置しなければならないため、可動部の質量が大きくなり低速となる。

本研究では高知県で生産量の多いピーマンを対象とし、高速化を目指した収穫ロボットの開発を行う。具体的には空間並進 3 自由度パラレルメカニズムを用いて水平方向に駆動する実験機を製作する。本稿ではリンクの配置を変えた場合の上部リンクに加わるトルクの比較を行う。また、製作した実験機の動作と今後の課題について述べる。

2. パラレルメカニズム

パラレルリンクロボットとは複数のアクチュエータを並列に制御させて最終出力先を動作させる機構である。特徴として各リンクに引張・圧縮のどちらかの力のみが作用する構造とできるため剛性を高めやすいこと、アクチュエータをベースに配置することで出力リンクが軽量となり、高出力化が容易であること、各リンクの位置の誤差が平均化されることで出力リンクの誤差は小さくなり高精度となることが挙げられる⁽³⁾。これらの特徴は収穫時に果実を傷つけにくい点、高速な動作で効率を良くできる点で効果的であると考えられる。

2.1 提案するリンクメカニズム

パラレルリンクロボットのモデル図を図 1 に示す。ベース上に配置した 3 つのアクチュエータによる入力力で 3 自由度の並進運動の位置決めを行う。リンクをつなぐジョイントと出力リンク上のジョイントは 2 自由度である。収穫した後に回収できるように原点付近も可動させるためベースと出力リンクの半径、各リンクの長さをそれぞれ等しくしている。

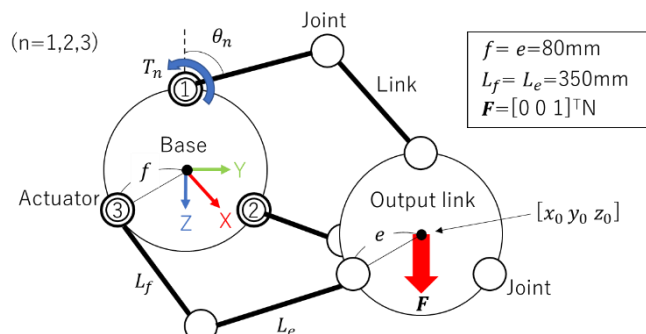


Fig. 1 Parallel link robot parameters

従来のパラレルリンクロボットは鉛直方向で用いられるが、収穫ロボットでは鉛直方向の動きでは難しい場合が多く、水平方向に駆動するロボットについて考察する。この場合図 1 のように手先にかかる荷重の向きが鉛直方向である Z 軸方向となり上部のアクチュエータの負荷が大きくなる。このため対応策としてリンクの配置を変える。

2.2 提案する配置

ベース上のアクチュエータの配置を変えたものを図 2 に示す。リンクはアクチュエータとジョイントをつなぎ、そこから出力リンク上のジョイントをつなぐのでリンクや出力リンク上のジョイントは同様の配置となる。

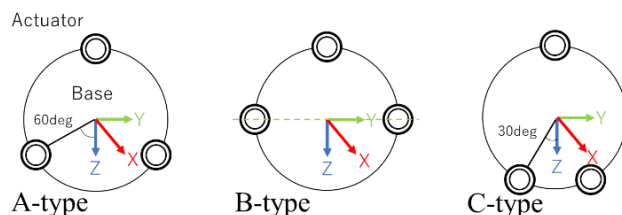


Fig. 2 Actuator placement

図 2 に示すように X 軸周りに 120 度位相でリンクを配置した通常の A-type およびリンクの位相を変化させた B-type, C-type について静力学、動力学における解析を行った。具体的には出力リンクに作用する力が 1N と仮定し、上部リンクに加わるトルクの比較を行いリンクの配置を変えることで負荷の軽減を目指した。

2.3 静力学・動力学における力の入出力関係

入力角度 $[\theta_1 \ \theta_2 \ \theta_3]$ と出力位置 $[x_0 \ y_0 \ z_0]$ の微小変化量の関係からヤコビ行列は以下となる。

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial x_0}{\partial \theta_1} & \frac{\partial x_0}{\partial \theta_2} & \frac{\partial x_0}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial y_0}{\partial \theta_1} & \frac{\partial y_0}{\partial \theta_2} & \frac{\partial y_0}{\partial \theta_3} \\ \frac{\partial z_0}{\partial \theta_1} & \frac{\partial z_0}{\partial \theta_2} & \frac{\partial z_0}{\partial \theta_3} \end{bmatrix} \quad (1)$$

静力学における出力リンクに作用する力 \mathbf{F} と各アクチュエータにかかるトルク \mathbf{T}_s の関係は以下となる⁽³⁾。

$$\mathbf{T}_s = \mathbf{J}^T \mathbf{F} \quad (2)$$

y_0 と z_0 は 0mm, x_0 を 250~550mm まで 100mm ずつ動かしたとき上部リンクに加わるトルク T_{s1} と x_0 の関係を図 3 に示す。

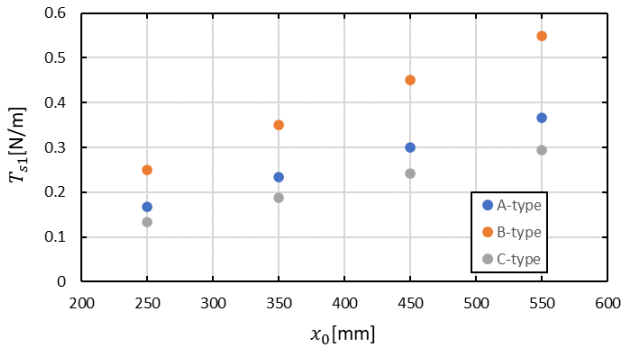


Fig. 3 Top torque in statics

動力学については閉リンク機構である平行メカニズムを仮想的に切断し木構造開リンク機構であると考え、式(3)に示す開リンク機構の動力学計算法を用いて計算する。

$$M(\theta)\ddot{\theta} + c(\theta, \dot{\theta}) + g(\theta) = T_0 \quad (3)$$

仮想的な開リンク機構のトルク T_0 から現実の平行メカニズムのトルク T_d への変換を行う⁽⁴⁾。出力位置は静力学と同様の条件で、アクチュエータを角速度 4.759rad/s で動かしたときの上部リンクに加わるトルク T_{d1} と x_0 の関係を図 4 に示す。

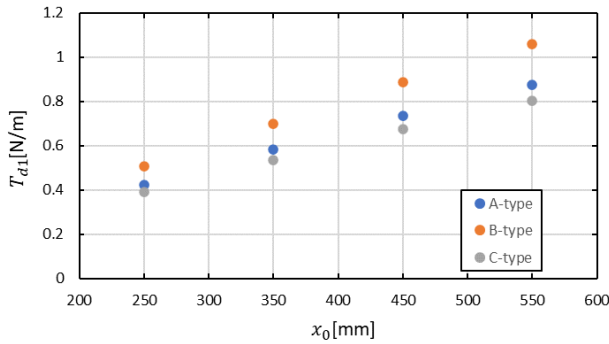


Fig. 4 Top torque in dynamics

図 3, 図 4 から静力学と動力学のどちらも上部リンクに加わるトルクは C-type が一番小さくなっていることがわかる。平行リンクロボットを水平方向で駆動させる場合は C-type に変えることで負荷を軽減できる。

3. 実験機の製作と動作

3.1 製作した実験機

実際に製作した実験機を図 5 に示す。リンクの配置は C-type とし、ベアリングと回転軸以外は 3D プリントによって製作した。各パラメータについては図 1 と同様である。



Fig. 5 Prototype of Parallel link robot

3.2 可動範囲

平行メカニズムの順運動学によりアクチュエータの入力角度 $[\theta_1 \theta_2 \theta_3]$ から出力位置 $[x_0 y_0 z_0]$ を算出した⁽⁵⁾。入力角度をそれぞれ 0~80 度まで 10 度ずつ動かしたときの出力位置を MATLAB でシミュレーションしたものを図 6 に示す。

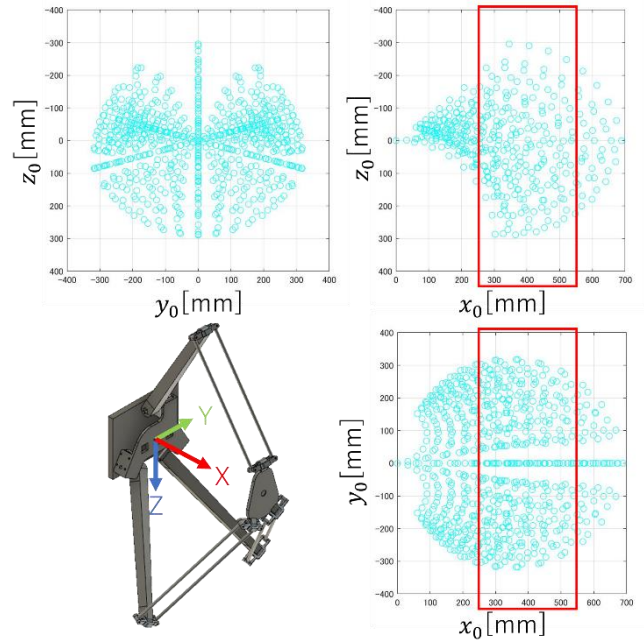


Fig. 6 Output position of each plane

実験予定のハウスのピーマン畑では畝間の中心から 400~600mm の範囲に果実は分布しており、出力リンクに取り付けるエンドエフェクタの大きさを 50~150mm とすると水平方向である x_0 が 250~550mm の範囲で広く可動できればよい。図 6 からおおよそ Y 軸方向に -300~300mm, Z 軸方向に -250~250mm の範囲で可動できていることがわかるので移動機構に載せて運用することを考えると十分である。

3.3 実験機の動作

近藤科学のサーボモータ KRS-6003HV を用いて実験機を動作させ、目標位置と出力位置に誤差がないか検証した。条件 1 として $y_0, z_0=0$ とし、 $x_0=200, 400, 600$ mm の順で初期位置から動作させてモーションキャプチャを用いて取得した出力位置を図 7 に、条件 2 として $x_0=400$ mm, $[y_0 z_0]=[-200 -200], [200 -200], [200 200], [-200 200]$ mm の順で初期位置から往復させて取得した出力位置を図 8 に示す。

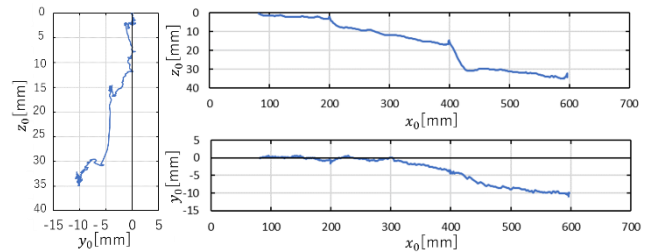


Fig. 7 Condition1 Output position of each plane

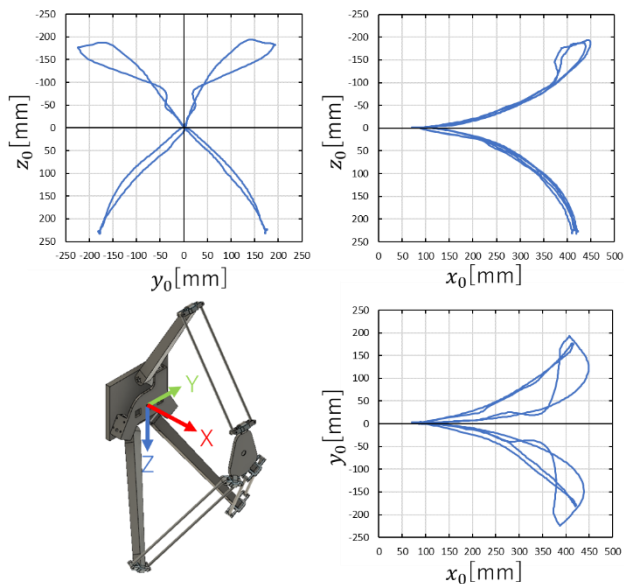


Fig. 8 Condition2 Output position of each plane

条件 1 について目標位置が 600mm のとき z_0 は 33.1mm 下がっていて、 y_0 は -10.1mm ずれている。これは水平方向で駆動しているのもータの軸が今回の場合 30 度傾いていることが原因で自重により下部リンクが下がり誤差が生じているのではないかと考えられる。条件 2 についても出力位置に誤差がみられ、経路が行きと帰りで異なり円弧を描いている。目標位置までの直線を分割して入力を細かく指定することで出力位置は直線的に進み、精度は向上するのではないかと推測する。

4. 結言

パラレルメカニズムを用いた収穫ロボットについて、リンクの配置を変えた場合の上部リンクに加わるトルクを比較し下部リンク 2 つを Z 軸から 30 度の位置に変えた C-type にすることで負荷を軽減できることがわかった。実際に実験機を動作させることができたが、目標位置と出力位置の誤差が生じていることの課題が挙げられたので、今後は構造や制御方法について検討していく。

文献

- (1) AGRIST 株式会社
<https://agrist.com/products/robot>
 (参照日 2022 年 2 月 12 日)
- (2) inaho 株式会社ホームページ
<https://inaho.co/solution/raas>
 (参照日 2022 年 2 月 12 日)
- (3) 立矢宏, “パラレルメカニズム”, 森北出版株式会社, 2019.
- (4) 中村仁彦, “パラレルメカニズムの動力学”, 日本ロボット学会誌, Vol. 10, No. 6 (1992), pp. 709-714.
- (5) Delta robot kinematics-Tutorials
<https://hypertriangle.com/~alex/delta-robot-tutorial/>
 (参照日 2022 年 2 月 12 日)