水平駆動形パラレルメカニズムを用いた収穫用マニピュレータの制御

Harvesting Manipulator using Horizontal Drive Parallel Mechanism

知能機械工学コース

機械・航空システム制御研究室　1265003　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開発が期待されている．実際の開発事例として円筒座標系型，垂直多関節型[1][2]などのシリアルリンク型マニピュレータが挙げられるが，これらを採用したロボットはリンク間の各ジョイントにアクチュエータを配置しなければならないため，誤差の増大や可動部の質量が大きくなり高速で動かしづらいという課題がある．

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，高精度を目指した収穫用マニピュレータの開発を行う．具体的には，高速化が容易で精度が高いパラレルメカニズムを採用し，収穫動作に対応させるため水平方向に駆動する実験機を製作する．そして，3 つの制御方法について実験を行い，結果を比較して今後の展望について述べる．

2.　パラレルメカニズム

2.1　パラレルメカニズムの特徴

パラレルメカニズム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機構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先が軽量となり，高速化が容易であること，各リンクの誤差が平均化されることで出力先の誤差は小さくなり高精度となることが挙げられる[3]．これらの特徴は精度が高いことで果実を傷つけにくい点，高速な動作で作業効率を良くできる点で効果的である．

2.2　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で並進 3 自由度の位置決めを行う．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．従来のパラレルリンクロボットはピッキングや組み立て作業を行うために鉛直方向で用いられるが，収穫においては果実の上部にある葉や茎が邪魔をして鉛直駆動では難しい場合が多いため，水平駆動への変更を提案する．その場合，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，各リンクにかかる曲げ応力やそれに伴う変位が大きくなる．この対応策として，ベース側と出力側のリンク長さを等しくした．これにより負荷を軽減できることに加えて，ベース上の原点付近も動作できるようになるため，収穫後の回収動作が可能となる．

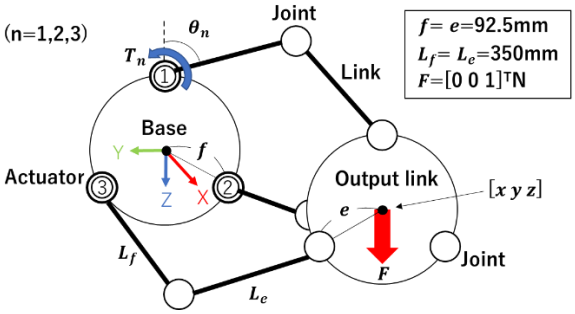

Fig. 1　Model of parallel link robot

3.　実験機の製作と動作実験

3.1　製作した実験機

実際に製作した実験機を図 2 に示す．DC モータとモータドライをそれぞれ 3 つずつ使用し，各リンクには軽くて丈夫なカーボン棒を採用している．ベースフレームと出力フレーム，その他の小さな部品については 3D プリンタで製作した．

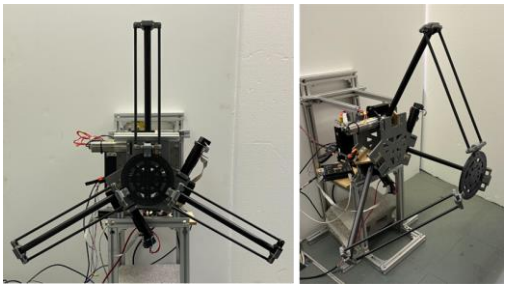

Fig. 2　Experimental manipulator

3.2　実験準備

実験環境を図 3 に示す．実験機の手先に RGB 情報と深度情報を取得できるカメラを取り付け，手先からピーマンまでの相対距離をフィードバックしながら対象に向かい，正面 200mm で停止する実験を 3 通りの制御方法（モータドライバによる局所位置制御，並進 3 軸の向きを考慮した角速度指令，ヤコビ行列を用いた軌道制御）で行った．各制御方法の詳細は次節で述べる．

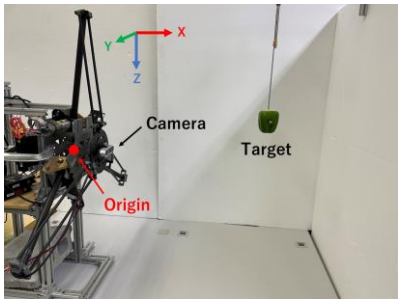

Fig. 3　Experimental environment with camera

3.3 制御方法

ブロック線図で使用する記号を以下のように定義した．

$\boldsymbol{y}$ ： 手先位置 $[x\ y\ z]$
$\boldsymbol{r}$ ： 相対距離の目標位置 $[r_x\ r_y\ r_z]$
$\boldsymbol{r_v}$ ： 手先の目標速度 $[r_{vx}\ r_{vy}\ r_{vz}]$
$\boldsymbol{u}$ ： モータ入力値 $[u_1\ u_2\ u_3]$ （角度，角速度）
$\boldsymbol{u_p}$ ： モータ入力値 $[u_{px}\ u_{py}\ u_{pz}]$ （位置）
$\boldsymbol{c}$ ： 手先とピーマンの相対距離 $[c_x\ c_y\ c_z]$
$\boldsymbol{e}$ ： 位置偏差 $[e_x\ e_y\ e_z]$
$\boldsymbol{d}$ ： 重力による外乱 $[0\ 0\ d_z]$

3.3.1 局所位置制御

局所位置制御のブロック線図を図 4 に示す．Z^{-1}ブロックは前回値の保持，inverse kinematics ブロックはパラレルメカニズムの逆運動学を表す．

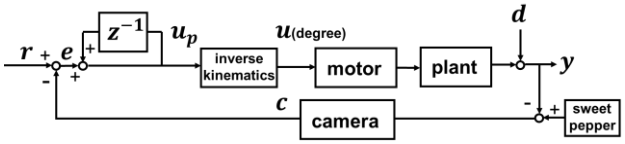

Fig. 4 Block diagram for Position control

局所位置制御では，ひとつ前の入力位置に現在の位置偏差を加算し，逆運動学によって 3 軸の並進位置を 3 つの角度に変換して角度入力を決定している．

3.3.2 角速度指令

角速度指令のブロック線図を図 5 に示す．K_{px}，K_{py}，K_{pz} ブロックは 3 軸それぞれの比例ゲインを表す．

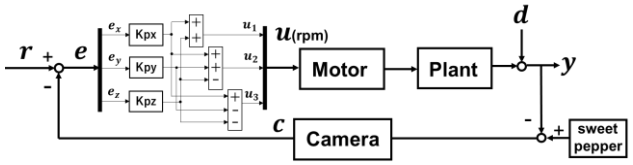

Fig. 5 Block diagram for Angular velocity control

角速度指令では，並進 3 軸方向を考慮したとき，それぞれのリンクの動作方向が手先の方向で決定されるため，式(1)に示すように，偏差にゲインを積算して足し引きによって角速度入力を決定している．

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{px}e_x + K_{pz}e_z \\ K_{px}e_x + K_{py}e_y - K_{pz}e_z \\ K_{px}e_x - K_{py}e_y - K_{pz}e_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

ただし，Y 軸の変位に対してリンク 1 の角度変位は小さいため，u_1の計算では位置偏差e_yを無視している．3 つのゲインについては任意の初期位置からシミュレーションを行い，その結果による試行錯誤によって基準とするゲインを決定した．

3.3.3 軌道制御

軌道制御のブロック線図を図 6 に示す．Jacobi ブロックはヤコビ行列を表す．

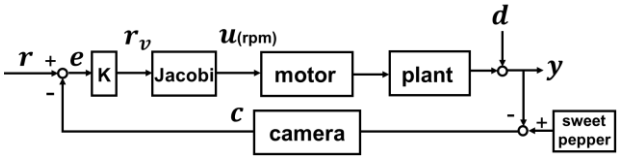

Fig. 6 Block diagram for Routing control

軌道制御では，ゲイン K によって位置偏差を手先の目標速度に変換し，手先の微小変位とリンクの微小角度の関係を表すヤコビ行列により手先速度をリンクの角速度入力の目標値に変換している．軌道制御の場合もシミュレーションによって基準とするゲインを決定した．

3.4 実験結果

図 7 にモーションキャプチャを用いて取得した手先の軌跡，図 8 に手先の速度を示す．赤線，青線，黄色線の順で局所位置制御，角速度指令，軌道制御であり，図 7 における緑点は対象物のピーマンの位置である．また，図 7 と図 8 によって得られた最大速度，収束時間，最終的な誤差について比較した結果を表 1 に示す．

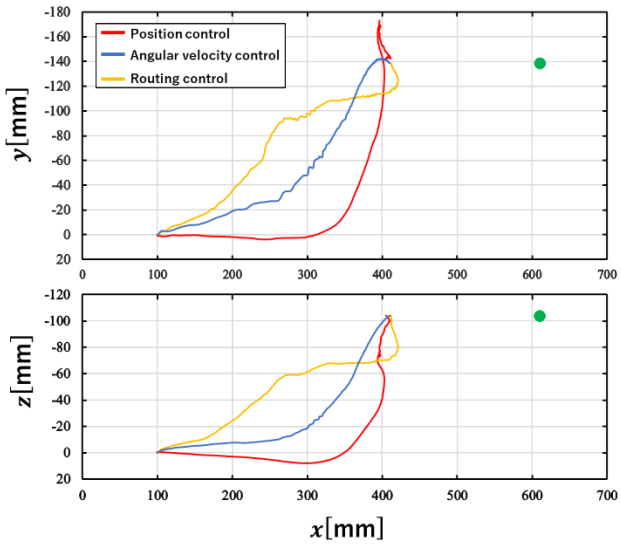

Fig. 7 Experimental result of Trajectories

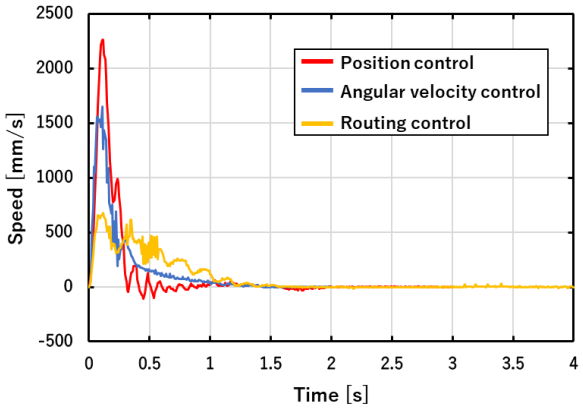

Fig. 8 Experimental result of Speed

Table 1 Comparison of experiment

	Max speed [mm/s]	Time [s]	Error [mm]		
			e_x	e_y	e_z
Position control	2258.51	2.32	-4.95	3.37	0.27
Angular velocity control	1648.61	1.42	0.55	0.22	0.31
Routing control	678.74	3.65	0.80	-0.48	0.13

図 7 より制御方法によって軌跡が異なることがわかる．局所位置制御は 3 つのモータを同じ最大角速度で動作させているため，初め X 軸に沿って進んでいる．これに対して角速度指令，軌道制御については，各ゲインによって定めた異なる角速度を 3 つのモータに入力しているため，最初から Y 軸と Z 軸方向へ動作している．特に，軌道制御についてはヤコビ行列の特性から Y 軸と Z 軸方向へ最も素早く動作しており，直線的な軌跡となっている．また，表 1 より局所位置制御は高速な動作が可能だが，収束時間や精度が悪いこと，角速度指令はある程度の高速な動作が可能で，収束が早く精度が高いこと，軌道制御は低速な動作で収束は遅いが，精度が高いことがわかる．これらの原因としては，局所位置制御は入力位置に到達するまで待つ時間が生じるために修正が遅くなってしまうこと，軌道制御はヤコビ行列の計算に時間がかかり，ゲインを上げづらいことが挙げられる．以上の結果から，単純に高速で動作させたい場合は局所位置制御を，収束時間を早めたい場合は角速度指令を，経路設計を行いたい場合は軌道制御を使用すればよいことがわかった．

4. 結言

高速，高精度を目指した収穫用マニピュレータとして，水平に駆動するパラレルメカニズムを提案し，実験機を製作した．実験機の手先にカメラを取り付けて動作実験を行い，3 つの制御方法について比較することで各制御方法の利点と欠点がわかった．

今後は最も結果が良かった角速度指令についての最適なゲインの検討，ハンド機構や認識機構，移動機構との組み合わせの検証を行い，実際の農地での実験を行っていく．

謝辞

本研究は高知県の「IoP が導く Next 次世代型施設園芸農業への進化プロジェクト」の助成を受けております．この場をお借りして感謝申し上げます．

文献

(1) AGRIST 株式会社ホームページ
https://agrist.com/products/robot
(参照日 2024 年 2 月 9 日)
(2) ヤンマーホールディングス株式会社ホームページ
https://www.yanmar.com/jp/news/2022/03/01/104681.html
(参照日 2024 年 2 月 9 日)
(3) 立矢宏，“パラレルメカニズム”，森北出版株式会社，2019.