

携帯型マニピュレータの開発

桑野 晃希, 吉成 哲, 中島 康博

Development of the Field-Portable Manipulator

Kouki KUWANO, Satoshi YOSHINARI, Yasuhiro NAKAJIMA

抄 録

本研究ではリンゴ栽培作業のうち収穫作業をターゲットとして、脚立の使用に伴う危険や負担を解消し、地上から安全に収穫できるロングブーム状の携帯型マニピュレータを開発した。先端部は、もぎ取りに必要な3自由度の機構とし、果実や果樹に損傷を与えないよう、人力で動作し力加減が可能なワイヤネットワークを考案した。実験の結果、商品価値を左右する果梗が付着した状態の果実が収穫できることを確認した。また、マニピュレータの保持負担を軽減する装着具を併せて開発し、その効果について検証した。

キーワード：携帯型，マニピュレータ，ワイヤ，人力，リンゴ

Abstract

A field-portable human power drive manipulator for the apple harvest was developed in this research. On the point of long boom, a mechanism of three-rotation degree of freedom actuated by a tendon pulley drive system is structured, and fruits that adhered calyx can be harvested. The harvest work became possible from the ground easily and safely without ascending the stepladder or transporting it by this manipulator. Moreover, the installation tool that reduced the load according to the keeping of the manipulator was developed, and the effect was confirmed.

KEY-WORDS : Human Power, Field Portable, Apple Harvest, Tendon

1. はじめに

北海道の果樹農業は平成15年でみると樹園地面積3,580ha、販売農家戸数920戸、農業産出額が約66億円である。本道農業全体に占める果樹農業の割合は樹園地面積や農業産出額でみると比較的小さいものの、豊かな食生活の形成に重要な役割を担うものであり、都市住民等が観光農園で農業生産者と触れあう場として果樹栽培は重要な側面を持つ。作物別に見ると北海道ではリンゴ、ぶどう、なし、おうとうが特に収穫量が多い。

その一方で、担い手の減少や高齢化の進展、また他の農作物に比べ作業の省力化・機械化等が立ち遅れていることから、

安全で快適な栽培環境の構築が求められている状況にある(H18北海道果樹農業振興計画)。他の農作物が平面的で比較的規則正しく栽培されているのに対し、果樹栽培では果実や摘花等の対象が立体的かつランダムな配置であり枝や葉が入り組んでいること、果樹自体が起伏のある丘陵地に栽培されること等が機械化が容易に進まない原因とされている。結果として手作業に負うところが大きくなる。実際、栽培作業は剪定に始まって、摘花、摘果、葉摘み、収穫まで、スピードスプレイヤーによる防除作業を除いてほとんどが人の手作業である。特に収穫作業に着目すると、北海道における果樹生産量の約40%を占めているリンゴ栽培のうち、例えばハックナインの場合、脚立作業時間の40%以上を占める。

事業名：一般試験研究

課題名：携帯型マニピュレータの開発（平成17～18年度）

2. リンゴ収穫作業の調査

近年、リンゴの樹木は樹高が低い種類の“わい性台木”に接ぎ木することで収穫作業がしやすい低木化が進められている。しかし、極端な低木化は果樹一本あたりの収穫量が減ることや、北海道では積雪があり樹木下部が雪に埋まってしまうことから低木化には一定の限界がある。一方、高所作業車は脚立を使用せずに果実が収穫できるが、高価であり傾斜地での運転には一定の技量を必要とすること等から、収穫においては脚立を使用した作業が主流となっている(図1)。作業者は脚立を上ってリンゴをもぎ取り、手にしている手籠に納めていき手籠がいっぱいになると、より大きなケースに移し替えながら作業は進んでいく。したがって、作業には脚立の上り下りと、果樹から果樹へ脚立を運搬する身体負担が伴う。



図1 脚立を使用した収穫作業

ところで、リンゴの収穫では生育上の特徴を生かすもぎ取り方法がとられている。すなわち、リンゴは成熟するとともに離層(りそう)と呼ばれる強度的に弱い部分が形成され(図2)果実が果梗(かこう)、いわゆるヘタとともに枝から



図2 収穫されたリンゴ

落ちやすい状態になる。収穫では果実を回し(図3)、この離層部に曲げ力を加えることで過大な力を加えることなく、またハサミを使用せずに切断でき、果梗付きのリンゴが収穫できる。この操作をせずに無理に引っ張ると、果梗が枝側に残されリンゴの商品価値を落したり、枝を損傷して樹木が腐らん病に罹る恐れが生じる。なお、リンゴは垂直にぶら下がっている場合ばかりではなく、様々な方向に向いて結実しているため、作業者は経験に基づいて最適な方向に果実を回してもぎ取る。



図3 もぎ取り操作

3. 携帯型マニピュレータの提案

以上のことから、収穫作業に限っても他の作物で進んでいるような機械化が難しいことがわかった。そこで手作業における身体負担の原因の一つに脚立の使用があることに着目し、脚立を用いずに地上から収穫作業が可能なロングブーム状のマニピュレータの開発に着手した(図4)。マニピュレータ先端部に求められる機能として、以下の項目が挙げられる。

- ・果実の把持機能。
- ・離層を中心としたねじり機能。
- ・果実の高さや向きに合わせて、上記ねじり運動の軸を変えられる屈曲機能。

また果実や枝には無理な力がかからないようにしなければならない。そこで上述の機能を実現するにあたって、操作者の力加減ができるようモータ等のアクチュエータを用いず、ワイヤを伝達要素とする人力駆動をベースとした構成とした。アクチュエータを使用しないことから、電源ケーブルを引き回したり、バッテリーの装備や充電が不要となり、より携帯性が向上する。

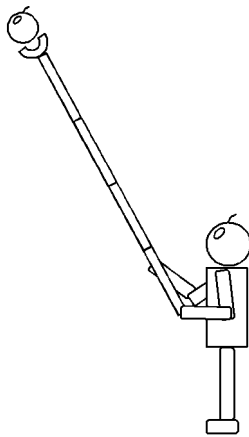


図4 マニピュレータ概観図

4. 機能試作機による検討

4.1 設計および製作

前述の点を踏まえてマニピュレータの全体の基本仕様を以下のようにまとめた。

- ・マニピュレータ先端部は把持、屈曲、ねじりの3自由度を有する。
- ・ワイヤ伝達による人力駆動方式。
- ・ブーム長は2m。

ここで、上記自由度を実現するためのワイヤの本数について検討した。一般的に牽引用途で使用する場合、2本一組のワイヤによって対象への荷重を任意に操作できる。自転車のブレーキ系統のように一方をパネで代替することも可能であるが、その場合、力の加減ができるのは一方向のみに限られる。さて、今回は3自由度系なので単純計算では計6本のワイヤが必要となる。ところが、MoreckiらやSalisburyは一

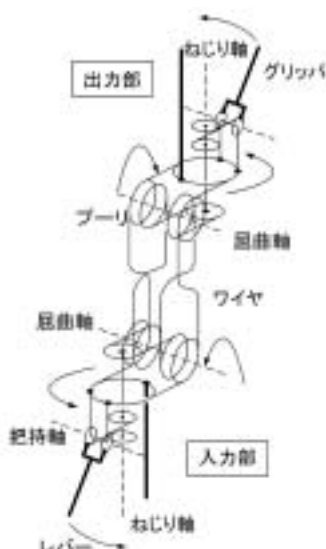


図5 考案したワイヤネットワーク

方向にしか力を供給できない要素（ワイヤ）で、正逆両方向に運動するn自由度の機構を駆動する際、最小限必要な要素の数はn+1であることを示した。この法則によれば、3自由度の操作を可能にするワイヤの本数は4本ということになる。今回のように果樹の枝の中に差し入れるような、スリムな形状が求められるマニピュレータにはワイヤの取り回しを簡素化でき有効である。そこで図5のような回転要素からなるワイヤネットワークを考案した。図より一本のワイヤがある特定の自由度に1対1で対応しているわけではないことがわかる。一本のワイヤが屈曲とねじりの動作に関与したり、ねじりと把持に関与するなどしてワイヤを効率的に利用している。ブーム長は一般的な脚立での作業高さを考え、2mとした。製作したマニピュレータを図6に、各部の詳細を図7に示す。



図6 機能試作機の全景

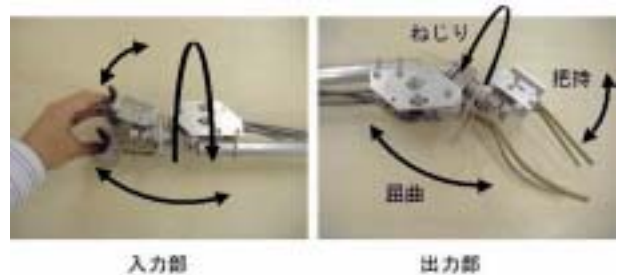


図7 機能試作機の各部詳細図

4.2 実地試験および検証

試作したマニピュレータで実際の果樹（ふじ種）を対象に収穫試験を行い機能を検証した（図8）。その結果、把持感覚や抵抗を手元で感じながら、様々な高さの果実を果梗が付



図8 機能試作機による実地試験の様子

いた状態で収穫でき、自由度数やそれぞれの動作が十分に機能することを確認した(図9)。ただし、重量面や操作性については以下に述べる課題を残した。



図9 もぎ取られたリンゴ

4.2.1 重量

主要な部品はアルミニウム製とすることで軽量に配慮していたものの、重量は4.5kgであった。重量自体は決して保持できない値ではないが、長時間の使用には限界があった。また、図10の模式図のように仮にマニピュレータが一般的な密度だとすると、垂直に保持する場合は両手で重量を分担することが可能であるが、リンゴを籠に移すために水平に倒すと、リンゴの重量も加わって保持負担が増大することが判明した。

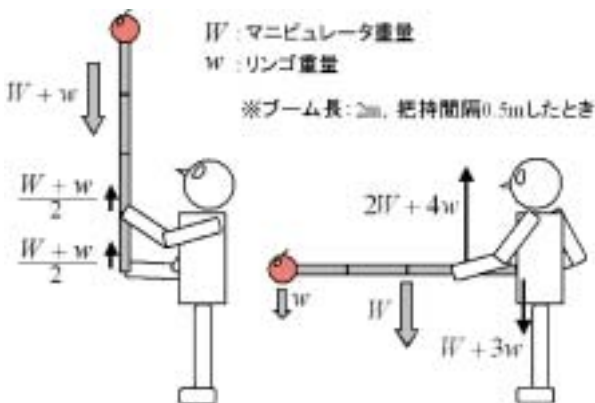


図10 マニピュレータの保持負担

4.2.2 屈曲およびねじり操作

入力部と出力部を相似形としたことが操作性を欠く結果となった。これは、屈曲操作において入力部と出力部の回転位相が逆になっているため(図11上)、操作時の動作イメージとの実際の動きに食い違いが発生したためと考えられた。しかしながら、同じ機構で屈曲運動の位相を入力部と出力部で一致させるようにワイヤの経路を組むと、今度はねじり動作が逆位相になり、やはり動作イメージとの食い違いが発生してしまう。また、入・出力部の屈曲軸より先の部分の重量はそれぞれの屈曲軸を中心としたモーメントとして作用する。

入力部のみならず出力部のモーメントもワイヤを介して入力部に伝達されるため、入力部では合計モーメントを支えなければならない、操作性に悪影響を及ぼした(図11下)。このことから屈曲方向を入・出力部で同相にすることが、操作性を向上すると考えた。

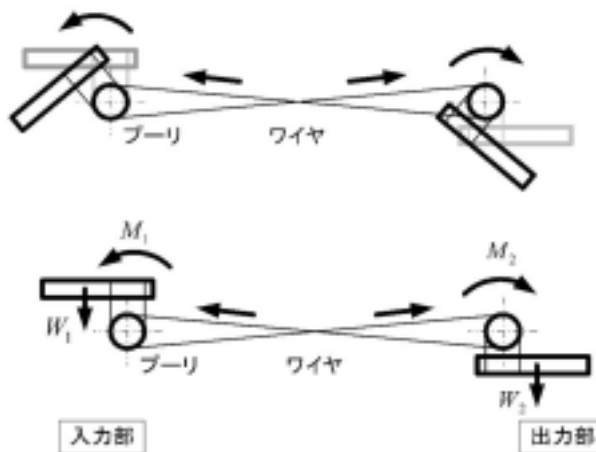


図11 屈曲運動の模式図

4.2.3 把持操作

本マニピュレータは操作者が右利きの場合、左手はマニピュレータの保持のみであるのに対し、右手はマニピュレータの保持に加え把持操作を担う。把持力はリンゴをもぎ取った後も籠に入れるまで、取りこぼさないよう持続しなければならない。つまり入力部の手はマニピュレータを確実に支える一方で、リンゴを優しく把持するという相反する側面があり、もぎ取ったリンゴを途中で落としてしまうといった課題を残した。

5. プロトタイプによる検討

5.1 改良と製作

前項で明らかになった課題を解消するため、以下の改良を施した。改良されたマニピュレータのプロトタイプを図12に、各部の詳細を図13に示す。

5.1.1 軽量化

部品の再設計とブーム部をアルミ製パイプからカーボン製パイプにしたことで、一定の強度を保ちながら重量を当初の4.5kgから1.5kgへの軽量化を図った。



図12 プロトタイプの実景



図13 プロトタイプの詳細図

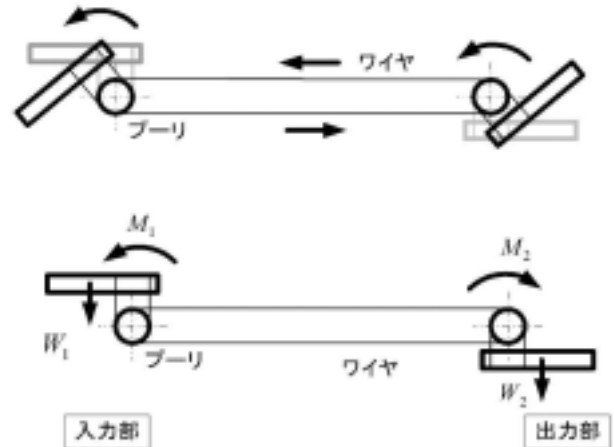


図15 改良後の屈曲運動の模式図

5.1.2 屈曲およびねじり動作の改良

検討の結果、入力部と出力部を相似形とした場合、屈曲動作およびねじり動作のそれぞれについて回転方向を一致させることは不可能であることが判明した。そこで図14のような

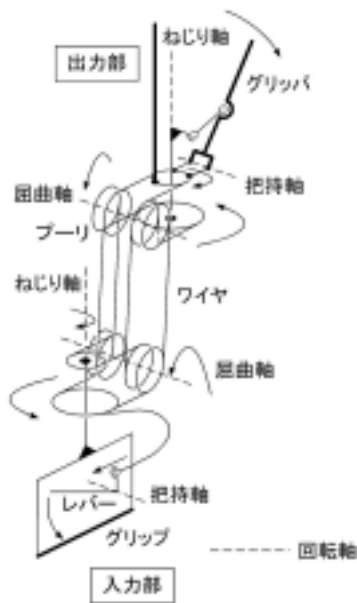


図14 改良したワイヤネットワーク

ワイヤネットワークに再構築し、両動作について入力部と出力部の回転方向を一致させ、動作イメージと実際の動きの一致を図った (図15上)。またこのことにより、両部の重量が発生する屈曲軸周りのモーメントが互いにワイヤを介して打ち消しあう方向に作用し、より違和感のない操作が可能になった (図15下)。

5.1.3 把持機構の改良

入力部をグリップとレバー形状とし、レバーを握ると出力部のグリップが開き、レバーを開放するとグリップは出力部に組み込んだバネ力で閉じる構成とした。バネ力はリングの

保持に十分な大きさに調節した。操作手順としては、操作者はまずマニピュレータ先端をリングに近づけ、屈曲操作によってリングのねじり軸を決定する。手元のレバーを握ることで先端のグリップが開き、レバーを開放してグリップがリングを把持する。ねじり操作によりリングをもぎ取ったあとはグリップのパネ力でリングは確保されているので、操作者はレバーを意識する必要はなくグリップを握ってマニピュレータを保持する。籠上まで果実を移動後、再びレバーを握ってリングを離す。以上のように、出力部側に把持力を負担させることで、籠までの間に果実を落とす恐れがなくなった。

5.1.4 マニピュレータ保持具

収穫したふじ種の重量を実測したところ159g ~ 406gであった。マニピュレータを軽量化する一方で、リングの重量は不変であり、400gの重量を長さ2mのブーム先端で支えるだけでも、相当の負担が上体に加わることとなる (図10)。そこで、マニピュレータの取り回し性は維持しつつ、保持負担を軽減する装着具を新たに開発した (図16)。特徴は、ヒンジで多段に接続された部材により、先端部は身体を基準とし



図16 保持具を装着した様子

て水平面内で自由に動かせる一方で、ガスダンパーによって垂直方向に関してはアシスト力を発生するようになっている(図17)。したがって、アーム先端部で保持されたマニピュレータは自由な位置に確保しつつも、その重量がアシストされることになる。アシスト力はガスダンパの支点位置を変えることで調節可能である。図18は3 mの高さのリンゴをもぎ取る際のマニピュレータの持ち上げ時とリンゴを把持した後の、下げ降ろし時について保持具の効果筋負担の比較で示している。特に筋負担が大きかった左肩の筋(左三角筋前部)を例として、最大筋力発生時との比(%MVC)で表示してある。三角筋は腕の持ち上げ時に使われる筋であり、図から筋負担が軽減されていることがわかる。

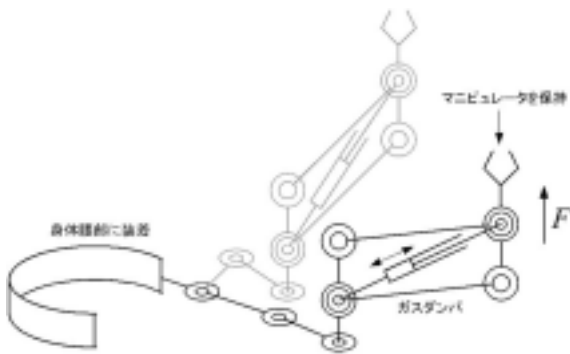


図17 保持具の構造



図18 筋電図(左三角筋)による保持具の効果検証

5.2 実地試験による検証

プロトタイプを用いて収穫作業試験を果樹園で実施した(図19)。果樹園の中で平均的な樹高(3.6m)の果樹(ふじ種)を対象に、マニピュレータの機能および操作性を検証した。その結果、よりスムーズで負担の少ない操作が可能になり、脚立を使用せずに、ほぼすべてのリンゴが傷を受けることなく収穫できることを確認した(図20)。

6. まとめ

本研究では、リンゴ収穫作業の軽労化を目的にロングブー



図19 プロトタイプによる実地試験の様子



図20 収穫されたリンゴ

- △形状の携帯型マニピュレータを開発し、以下の結果を得た。
- (1) もぎ取り作業には、ブーム先端部に3自由度の機構が必要であることがわかった。
 - (2) リンゴや果樹に損傷を与えないために、上記自由度を人力で動作させる機構と力加減が可能なワイヤネットワークを考案した。
 - (3) マニピュレータの取り回し性を損なわずに重量負担を軽減する、身体装着型の保持具を考案し有効性を確認した。
 - (4) 実地試験の結果、脚立の使用に伴う負担を解消し地上から安全に、果梗(ヘタ)付きの果実を収穫できることを確認した。

謝辞

本研究で使用した3次元動作撮影解析システムは、競輪補助事業の補助により整備されました。記して感謝いたします。また本研究を行うにあたり、試験環境の提供、貴重なご意見をいただいた中央農業試験場研究員にお礼申し上げます。

引用文献

- 1) 北海道立中央農業試験場 作物開発部 果樹科：高所作

業台車利用および低樹高化によるりんご栽培の軽労化，
北海道農業会議資料，PP20，(2002)

- 2) Mason M.T, Salisbury J.K, Robot Hands and the
Mechanics of Manipulation, MIT Press, 328PP.,
(1985)