摘み取り指の弾性を活かした切断後把持戦略とその設計手法

原 紳^{*1}, 柏寄 勝^{*2}, 青山 リエ^{*2}, 尾崎 功一^{*3}

Holding after cutting strategy and design technique utilizing elasticity of picking fingers

Shin HARA^{*1}, Masaru KASHIWAZAKI^{*2}, Rie AOYAMA^{*2} and Koichi OZAKI^{*3}^{*1} Innovation Center for Research and Engineering Education(ICREE), Faculty of Engineering, Utsunomiya University
7-1-2 Yoto, Utsunomiya-shi, Tochigi 321-8585, Japan^{*2} Research Farm, Faculty of Agriculture, Utsunomiya University
443 Shimokomoriya, Mooka-shi, Tochigi 321-4415, Japan^{*3} Dept. of Mechanical and Intelligent Engineering, Graduate School of Engineering, Utsunomiya University
7-1-2 Yoto, Utsunomiya-shi, Tochigi 321-8585, Japan

Received 1 June 2015

Abstract

The modern agriculture shows remarkable results in productivity for labor saving by mechanization. However, it is still difficult to replace the dexterous human ability in handling objects with mechanisms. Many tasks in agriculture depend on human dexterity especially when it comes to pluck delicate fruit without damage to preserve quality. Strawberry is one kind of fruit that needs extra handling care during plucking, due to its brittleness against force and heat. Therefore, detailed observation and evaluation need to be done in order to produce a harvesting machine. This paper proposes strategy and design of finger for strawberry harvesting. In the strategy, there are three cases which are "cutting after holding," "holding after cutting" and "same timing of cutting and holding". In the cutting after holding and the same timing of cutting and holding, it is complex and heavy for the mechanism to achieve them. In the opposite case of the holding after cutting, it is easily achieved by simple mechanism which is a holding finger with an edge. However, high velocity of closing finger is needed to certainly grasp the stem during its free fall. A problem that a general robot hand loses grasping the stem is occurred, since closing velocity is insufficient. Therefore it is applied for the insufficient velocity of the closing to follow up it on restoration of elastic deformation of the finger. It deploys a pair of elastic, flexible fingers to cut and grasp the stem before the fruit falls. An experimental device was developed for strawberry harvesting, and mounted on a harvesting robot. Its performance was analyzed and evaluated. Results showed it worked as designed and intended.

Key words : Agriculture, Robot, Harvest, Pluck, Strawberry

1. 緒 言

近代農業は機械化による省力化により、生産性において目覚ましい発展を遂げた。しかし、人間の視覚や触覚による細やかな作業を、機械に置き換えることは困難であり、依然、人の手による作業が多く存在する。作物の収穫においても、外観のダメージが商品価値に大きく影響する場合、摘み取り作業は人手に頼ることとなる。特にイチゴは果肉が外力や熱などの刺激に弱く、摘み取りから選別、梱包、出荷におけるまで、極力果実に触れたり、圧力を加えたりすることの無いよう細心の注意が必要とされる作物である。一般的に果皮・果肉に触れず収穫する動作は切断および把持の二つの動作から構成され、これをどのような機構で実現するかが課題となる。ここで、切断・把持の収穫動作について各動作のタイミングから、(1) 把持後切断、(2) 切断後把持、(3) 把持・切断同時、の3つに分類できる。把持後切断は果柄を把持してから果柄を切断するものであり、把持・切断の挟み込みの2段階動作が必要とされるが、果実を落下させることはない。切断後把持は果柄を切断してから落下中の果柄を把持するものであり、切断刃と把持面の配置によって切断と把持とのタイミングを合わせる必要がある。把持・

No.15-00304 [DOI:10.1299/transjsme.15-00304], J-STAGE Advance Publication date : 15 September, 2015

^{*1} 正員, 宇都宮大学工学部附属ものづくり創成工学センター (〒321-8585 栃木県宇都宮市陽東 7-1-2)^{*2} 宇都宮大学農学部附属農場 (〒321-4415 栃木県真岡市下簗谷 443)^{*3} 正員, 宇都宮大学大学院工学研究科

E-mail of corresponding author: hara@cc.utsunomiya-u.ac.jp

切断同時は太さにばらつきのみられる対象物においては実現が困難である。

本研究では機構的な簡便さと実用性の観点から、切断後把持機構によるイチゴ摘みロボットを開発した(尾崎, 2006)。このロボットには汎用的なロボットハンド(1自由度2指)が採用され、単なる開閉動作だけでイチゴの果皮に触れることなく、果柄を切断・把持した果実の摘み取りが実現されている。本論文では、このロボットに採用された摘み取りハンドの動作原理を述べ、簡便な機構でも十分収穫が可能な2指構造の構成を提案する。

2. 先行研究

動作分類に基づいて他の研究や手法について考察する。先の3つの収穫動作の中で最も多く採用されているのが把持後切断による機構であるといえる。まず最も身近な道具として高枝切ハサミが挙げられる。このハサミは、まず枝等を把持する機構と、切断する機構(ハサミ)が並列的に配置されており、ハサミを閉じ切断する動作に先んじて把持する機構となっている。これにより切断対象を落下させることはない。さらに、農作物収穫ロボットの摘み取り機構でも把持後切断が主流であった(林, 2001)(林他, 2001)(Van henten, et al., 2002)(林他, 2003)(崔他, 2007)(Kondo, et al., 2010)(田口他, 2010)(林他, 2012)。これらのロボットにおいては、把持後切断を実現するための機構を各々開発しており、比較的大がかりな構成である。当然ながら手先荷重が大きくなるためにマニピュレータ部も比較的大型なものを採用しなければならない。また、汎用的なロボットハンド及び小型マニピュレータを用いた研究事例では、イチゴを切断後、吸引によって把持する方法(有馬他, 2001)が提案されている。しかしながら、イチゴの損傷を避けられないことと、吸引装置が必要であることから、やや特殊な方法といわざるを得ない。

近年においては、Hayashiら(Hayashi, et al., 2010)(Hayashi, et al., 2014)により切断後把持動作のロボットについて報告がなされている。しかしながら、この報告では切断後把持動作についての解析や考察が示されていない。

工業製品生産等において、コードなどの切断径が均一な物を対象とした切断・把持の自動化では切断・把持同時が一般的と推察される。しかしながら、イチゴなどの農産物の果柄を対象とした場合、切断径の多様さを前提とし、切断と把持に一樣でない時間差が生じることを考慮する必要がある。このため切断・把持同時動作は困難な手段と考えられる。

3. 切断後把持による摘み取り機構の提案

3・1 イチゴ成長の状態

植物の開花順序は花序と呼ばれ、イチゴは集散花序と呼ばれる順番で花芽が枝分かれを繰り返しながら多数出現する。その結果、葉や茎が込み入った状態で成長することとなる。このような状態でイチゴの果柄だけをねらいイチゴを収穫するには、人間の手先以上に小型で隙間をねらえるような細い機構であることが必要である。

3・2 汎用ロボットハンドの利用

実用的なロボット化を推し進めるには可能な限り汎用部品を利用した方が望ましい。そこで、図1のような開閉1自由度2指のロボットハンドの利用可能性を検討する。

把持後切断動作の場合には、開閉動作のタイミングを制御するために2自由度構成(ハンドを2段)とする(林, 2001)(林他, 2001)(Van henten, et al., 2002)か、先行して把持し遅れて切断するための連続的な機構(崔他, 2007)(Kondo, et al., 2010)(田口他, 2010)(林他, 2012)とすることが考えられる。いずれの場合も比較的大がかりな機構となり、マニピュレータの構成としても自由度の大きいロボットハンドの搭載は避けたいところである。また弾性体による先行把持も考えられる。しかし、紫外線に曝される環境(屋外)に対しての耐久性を考慮した材料選びが必須となる。さらに、スポンジのように多孔質で吸水性のあるもののような、洗浄性の悪いものも避けねばならない。果柄の切断・把持における果柄との接触部分は、切断・把持を繰り返すことで病原体拡散の原因ともなりかねないため、洗浄・消毒を頻繁に行うことを想定しなければならない。

切断後把持動作の場合においては、切断刃を把持面より突き出して配置するだけで、開閉1自由度2指の汎用ロボットハンドをそのまま利用することができる。すなわち、切断・把持指の構造を設計するだけでよく構造的

に最も簡便になると考えられる。ただし、切断後自由落下中の果柄を把持する必要条件としては、切断点から自由落下を始めた果柄が把持点を通過するまでに閉じなければならない。切断点から把持点までの垂直距離を十分とるか、指の開閉速度を早くすればよい。

Fig. 1 End effector

把持・切断同時動作の場合には、切断刃の突き出しを果柄の太さに合わせるための厳密な調節が必要であり、果柄径のバラツキを考慮すると実用化は困難であると考えられる。

これらを表 1 にまとめた。本研究では、汎用ロボットハンドの利用可能性および構造の簡便さから切断後把持動作の摘み取り機構を開発する。

なお、把持の開始には摩擦が関与する。摩擦係数に対し十分な締め付け力が発生するまですべりが発生してしまうが、この状態はきわめて短い時間であり、すべりによって果柄を把持し損ねることはない。これについては、実地試験（尾崎，2006）によって確認されている。ロボットによる摘み取りでは次工程の収納や検査のために強固な把持と把持位置の繰り返し精度が要求される。このために把持面の形状や寸法は先の実地試験で問題ないことが検証されており、剛性指による自由落下の観察において、すべりの現象は確認できなかった。このことから本研究では、把持面間の距離が果柄径に等しくなった瞬間に把持が成立したとする理想的状況を前提として考察を進める。

Table 1 The feature of the cut off and hold method.

	Advantage	Weakness
Cutting after holding	Easy correspondence to the individual differences	Complicated mechanism Upsizing Weight increase
Same time Cutting and holding	Simple mechanism	Difficult to apply to agricultural produce
Holding after cutting	Simple mechanism	Need high speed closing or Need vertical height for free fall
Holding after cutting utilizing elasticity of picking fingers	Simple mechanism	Design technique utilizing elasticity of picking fingers

3・3 切断後把持動作における果柄径と自由落下との関係

Fig. 2 Harvesting mechanism.

Fig. 3 Phase of harvesting.

切断後把持動作における果柄（イチゴ）の自由落下について述べる．図2に切断後把持動作の摘み取りハンドの構成を示す．切断後把持するためには，図3のとおり切断点（cutting point）を上部に配置し，自由落下中の果柄を把持するために把持点（grasping point）を下方に配置する必要がある．図3（a）～（c）は摘み取りの過程である．図3（a）は切断の完了した過程であり，切断刃の突き出し l_c は想定している最大果柄径と少なくとも等しい必要がある．図3（b）は果柄が自由落下している過程である．この図のとおり茎が細いほど，指が閉じるのに時間を要し，自由落下距離が大きくなる．図3（c）は把持を達成した過程である．指の速度が十分な速さでないと果柄を把持することはできない．果柄の自由落下距離 y は時間の二乗に比例し長くなるが，果柄径と自由落下距離の関係は式（1）のように表すことができる．

$$y = \frac{1}{2} g \left(\frac{l_c - ds}{v} \right)^2 \quad (1)$$

ここで， g は重力加速度， l_c は切断刃突出量， ds は果柄径，そして v は指の閉じ込み速さである．ただし， $0 < ds \leq l_c$ とする．式（1）により，想定される果柄径から自由落下距離を見積もることができ，それに合わせて把持指の高さおよび閉じ込み速さを見積もればよい．しかしながら，3.1節で述べたように把持指は小さい方が望ましく，汎用ロボットハンドを用いた場合には閉じ込み速さにも限界がある．このため，把持指の高さを可能な限り小さくするとともに，閉じ込み速さを確保するような構造について検討を行う

3・4 たわみを利用した把持

3.1 節で述べたとおり，摘み取りでは可能な限り小さな指で果柄を把持することが必要であるため，切断後把持動作を実現するためには十分な閉じ込み速度を得ることが必須となる．汎用ロボットハンドの開閉動作には，アクチュエータとしてエアシリンダもしくは電動モータが一般的に利用されている．エアシリンダは空気流量を高めることで比較的高速な開閉動作が可能であるが，空気供給のためのコンプレッサおよび配管を装備することが必要となる．そのため電動モータを用いたロボットハンドの方が利便性は高い．しかしながら小型モータを利用して十分な把持力を発生させるためには，減速比の大きい減速機を介して開閉が制御されている．すなわち開閉動作の速度は相対的に小さくならざるを得ない．そこで我々は，果柄切断時に発生する抵抗力による指のたわみを利用して閉じ込み速度を向上させる方法を提案する．図4はたわみを利用した切断後把持の挙動を概念的に表したものであり，図中の実線はロボットハンドの閉じ込み動作（制御量）を，破線は切断後把持の挙動を表している．また縦軸は双方の指の把持面の距離（隙間）を，横軸は時間経過を表している．このためたわみ量 e は双方の指のたわみの合算とする．

Fig. 4 Conceptual model of assumed closing behavior of a flexible finger. C is the point which is the end of cutting without elastic deformation. C' is the actual cut off point where the object starts to free fall. After cut off, the tip closes with vibration by $1/4f$. H is the holding point that is equal to the diameter of the stem. The distance (ds') is the diameter of the stem that is deformed by the pressure of the finger..

たわみが発生しない高剛性な指（以下これを剛性指と呼ぶ）での摘み取り作業の場合，先端部の軌跡は制御量に等しく，閉じ込みが進み把持面間の距離 l が l_c に達した瞬間の点 C（図3（a））で切断が終了し，自由落下（図3（b））を開始して，把持面間の距離が果柄径 ds に達する点 H（図3（c））まで自由落下を行う．この間の自由落下時間は $(l_c - ds)/v$ となる．

ここで，切断の抵抗力で指がたわむように，指の剛性を下げた場合（以下このような指を弾性指と呼ぶ）について考察してみる．切断力に達するまで閉じ込みに伴いたわみが発生し，把持面の距離が C に達するまでの時間は e/v となる．この間，切断が完了しないのであるから自由落下は発生しない．点 C' において切断が完了すると抵抗力を失い，たわみは復元力となって本来の位置に戻ろうとするため，固有振動数に基づいた減衰振動となる．減衰振動の振幅の中間点は実線で示される制御量であるため，時間経過に伴い振幅の中間点は点 H で果柄径に達し把持を開始する，さらに把持のための締め付けを行う過程（把持面間の距離が果柄径 ds から ds' に至る間）で大きく減衰し，把持力により果柄が圧縮され， ds' にて締め付けが完了する．このためたわみを利用した場合の自由落下時間 t は $(l_c - ds)/v - e/v$ つまり

$$t = \frac{l_c - ds - e}{v} \quad (2)$$

となり、たわみに要した時間分自由落下時間を短縮できることがわかる。また切断果柄径の最小値を ds_{min} 、自由落下距 y_{max} を設計上許容できる値とすれば、

$$y_{max} \geq \frac{g}{2} \left(\frac{l_c - ds_{min} - e}{v} \right)^2$$

である。したがって許容自由落下距離 y_{max} を与えられた時に弾性指に必要なたわみ量 e は

$$e \geq l_c - ds_{min} - \left(\sqrt{\frac{2y_{max}}{g}} \right) v \quad (3)$$

ただし、自由落下の開始を遅らせても、高速で閉じ込みを行わなければ意味がない。指の固有振動数を f とすると、切断力を失うことでたわみが復元し本来の位置に戻るまでの時間は固有振動数の 1/4 周期であるから $1/(4f)$ である。この時間が式 (2) で示される時間より少なくなければならない。つまり $1/(4f) < (l_c - ds - e)/v$ である。したがって切断果柄径の最小値 ds_{min} に対して

$$f > \frac{v}{4(l_c - ds_{min} - e)} \quad (4)$$

を満たさねばならない。さらに、弾性指の長さを L 、ヤング率を E 、断面二次モーメントを I 、切断力を P とすると、片持ち支持梁のたわみ量の公式より

$$e = 2 \left(\frac{PL^3}{3EI} \right) \quad (5)$$

となる。式 (5) に式 (3) から求めたたわみ量を当てはめることで、断面二次モーメントが導かれるので、その値を設計に用いれば、要求される自由落下量を満たす弾性指の寸法が得られることとなる。また弾性指の断面積を A 、密度を ρ 、先端部重量増加を m とすると、同様に片持ち支持梁の固有振動の公式より

$$f = \left(\frac{1}{2\pi} \right) \sqrt{\frac{EI}{\left(\frac{\rho AL}{3} + m \right) L^3}} \quad (6)$$

y_{max} と e に基づいて設計した弾性指に対し式 (6) で求めた固有振動数が、式 (4) を満たしていればよい。

4. イチゴ収穫ハンドの設計

4・1 設計値の検討

本研究では切断力によって発生したたわみが切断終了とともに一気に解放されることによる急速な閉鎖を利用することが前提である。そこでイチゴ（とちおとめ）の果柄を切断する過程における切断力の変化を図 5 に示す。切断実験には市販のステンレス製カッター刃を用い、直角せん断による切断力を観察した。切れ刃の送り速度は

4.3 mm/s で行った。使用した果柄の太さは 2.8 mm であった。時間軸は切れ刃の間隙がイチゴの果柄径に等しくなった点を原点とした。イチゴの果柄はその外周部（茎表面）に強度のある繊維質が集中し、内部はスポンジ状の柔らかな構造である。原点で切れ刃が果柄に接触し圧縮が始まるが、切れ刃が切断を開始する力に達するまで、圧縮変形を進め、点 P_1 に達した後には切断が始まっていることがグラフから読み取れる。こののち点 P_2 から再度切断力が高まり、点 P_3 達し切断力が一気に減少することで、切断が終了したことがわかる。このように切断の過程においては切断終了とともに急激に切断力が減少していることが確認できた。

Fig. 5 Detail observation of cutting force. The force increases till it reaches the cutting force " P_1 ", then the stem starts to be cut. The cutting force rises once again from the point " P_2 ". The cutting force decreases instantaneously at the point " P_3 ".

Fig. 6 Correlation between strawberry weight and its stem diameter.

図 6 は水耕栽培によるイチゴ（とちおとめ）の質量と果柄の太さの観察結果である。イチゴの果柄は分岐順に従い細くなっていくが、果実の重量は日照や温度などの条件に大きく左右されることが示されており（伏原他，1993）（熊倉， 宍戸， 1994），果実の質量と果柄の太さの関係は、図のようにある程度の傾向を示すが、どの質量においてもばらつきが大きい。摘み取り対象として想定する果柄径は太くなる側に余裕を見て、イチゴ収穫作業のロボット化においては、切断対象の果柄径は最大 4 mm 最小 1 mm とした。さらに果柄切断に必要な力の測定を行った。

Fig. 7 Correlation between strawberry stem diameter and its cutting force.

図 7 は様々な太さの果柄を切断するのに必要な力の測定結果である。この実験にも市販のステンレス製カッター刃を用い、直角せん断により切断力を測定した。切れ刃の送り速度は 78 mm/s で行った。この値も太さに依存す

る傾向をある程度示すが、ばらつきが大きい。そこで切断力は最大 12 N, 最少 6 N とした。これらの結果を表 2 にまとめる

Table 2 Physical property of strawberry for harvesting robot.

Strawberry	
Maximum stem diameter	4 mm
Minimum stem diameter	1 mm
Maximum cutting reaction force	12 N
Minimum cutting reaction force	6 N

4・2 設計製作

本研究は、ロボットによるイチゴの収穫作業の実用化を目指しており、そのため極力専用設計部品を減らし市販品で構成することとした。よってロボットハンドの専用設計は避け、汎用部品としてオリエンタルモーター社製 MHK4BH (ステッピングモータ) を採用した、その性能を表 3 に示す。

Table 3 Specification of the robot-hand.

Oriental motor MHK4BH	
Holding force	25 N $\pm$ 30%
Maximum speed	78 mm/s

先ず、剛性指を付けた弾性変形を利用しないロボットハンドの等速運動による切断把持の場合の最大自由落下距離を求める。式 (1) に、 $l_c = ds_{\max}$, $ds = ds_{\min}$, $v = 78 \text{ mm/s}$ を代入すれば最大自由落下距離は約 7.3 mm となる。この時自由落下時間は約 0.0385 s である。弾性指の寸法は最小限にとどめることを考慮した場合、搭載するセンサ等の考慮をして自由落下は 2 mm 以内にすると考えれば、式 (3) より、 $e > 1.42 \text{ mm}$ となり、果柄径 1 mm, 切断力 6 N の時にたわみ量 1.42 mm 以上が要求されることがわかる。このたわみ量をもとに、式 (5) より断面二次モーメントが導ける。また、弾性指の形態を片持ち支持梁と考え、先端荷重としてイチゴの最大質量を前提にすると、移動ロボットの部品として非常に脆弱な寸法になるため、モータの最大把持力が 25 N $\pm$ 30 % であることから、誤差範囲最大値の 32.5 N において安全率 2 倍程度を確保することを考える。また、材料としては、耐食性を考慮して SUS304 とする。ここで弾性指の切断把持点までの長さは、イチゴ摘み取りロボットとしての他の機能的要求により 142 mm に決定された。これらをもとに、弾性指の諸元を表 4 のように決定した。

Table 4 Designed value of finger

Finger	
Material	SUS304
Moment of inertia of area (I)	41.8 mm ⁴
Length(to cutting point)	142 mm
Width	4.5 mm
Height	5.5 mm
Cutter overhang (l_c)	4 mm
Flexure at 6 N	1.42 mm

以上の条件から、自由落下距離が最大となる場合として、最小切断力が最小果柄径の切断時に発生したとすると自由落下時間は 0.02 s, 自由落下距離 2 mm となり、要求仕様を満たす。この際、先端部には把持するための上下方向の高さによる先端部重量増、および果柄位置検出センサ取り付けのための重量増が発生する。これらに

よる形状の変更は先端部であり、応力分布を考えるとほとんどたわみ量に影響しないものと考えた。また切断把持点より先の部分は付加されたおもりと考え、これらの重量増加化を 13 g として、固有振動数を式 (7) より求めると、97.7 Hz となり、この値は式 (4) を満たす。

Fig. 8 End effector of strawberry harvest Robot.

これらの値より図 8 に示す形状の弾性指を制作した。図中に **Escape for cutter** との記述があるが、これはせん断力を逃がさず切断を行うために切れ刃の上下に受け面を設け、閉鎖した際に切れ刃を受け面と接触させないように作られた逃がし溝である。制作した弾性指を計測し、たわみ量が 6 N において 1.44 mm、固有振動数が刃物側指で 92 Hz、反対側の指で 90.8 Hz と設計値と大きな違いの無いことを確認した。農作物の出荷形態は規定値が定められ均一化が要求されている。この設計では収穫後の果柄の長さ 2 mm のバラツキを許容しているが、出荷先の規定に応じて後工程において切断調整等の処理の検討も必要となる可能性がある。

Laser Displacement Sensors x2
(Keyence LB-01)

Fig. 9 Experiment equipment.

5. 実験及び考察

実験にはとちおとめを用い、図 9 のような実験装置で行った。先端の位置の変化とモータハンド本体の運動をレーザ変位計にて測定することで、たわみの発生と、弾性変形からの復元による加速状況を観察した。またモータハンド閉鎖 (78 m/s) による切断把持の終了後、弾性指下端面で果柄を切断した後、全長を測定し、切れ刃から弾性指の下端面までの距離 (9 mm) との差を自由落下距離とした。農場での摘み取りの条件を再現するために切断位置から上方に出来る限り長く果柄が存在する状態での実験を行った。これは果実の質量による果柄の張力のみでせん断を行うためである。このため用意された供試体 100 個に対し各々 1 度のみの切断実験を行った結果を示す。供試体は実際の圃場からロボットによる収穫と同じばらつきとなるよう、片隅から順に 100 個採集したものをを用いた。また切断力は切れ刃の鋭利さと密接にかかわる。過去の別の実験で、同様の切断刃を用い 500 個以上の連続使用を行った際にも、直角で鋭利な切断面が保たれていた。このことから本実験では市販のステンレス製カッター刃 (新品) の連続使用による実験とした。また計測点と切断把持点は長さ方向に同一とした。

図 10 は果柄径と自由落下距離の実験結果である。青の点群は実験結果を、赤の実線はたわみを利用しない場合のモータハンドの閉鎖速度による時間で計算された自由落下距離を示す。また黄色の実線は図 7 の近似直線を用いた自由落下の計算値を示す。実験結果は明らかに自由落下距離が少なくなっていることを表している。すべての実験で目標値である自由落下距離 2 mm 以内を満たしている。

Fig. 10 Free fall distance as stem diameters. Blue points show experimental result. The solid line (red) shows free fall distance which is calculated by close rate of motor hand without elastic deformation (Hard finger). The solid line (yellow) shows estimate of free fall using approximate straight line on Fig.7 with elastic deformation (Elastic finger). The experimental results show that the elastic finger makes the free fall distance sufficiently small.

図 11 は果柄直径 1 mm, 1.5 mm, 2.3 mm の切断において、弾性指の先端把持切断部の変位をレーザ距離計で測定したものである。実線は左右の把持面間の距離、黒の破線はハンドコントローラに対する 2 本の指間距離の指令値、各々の色に応じた垂直の点線はたわみ量から換算した切断力より考えられる切断の終了時間を示す。よって、各々の実線との交点は図 4 で考察した切断終了点 C' となる。図 11 は図 4 で想定した挙動と概ね一致している。これらのことより、提案する手法は摘み取り機構の設計に有用であると判断できる。3.4 節で考察した弾性指の挙動では把持面間の距離が切れ刃の突出し量に等しくなる点を切断終了点 C' としたが、実験結果ではいずれの場合も切断終了時の把持面間の距離が切れ刃の突出し量より約 0.2 mm 程度少ない。また最大たわみ量から、式 (3) により求めた自由落下距離と実際の落下距離を表 5 に示す。果柄が若干楕円であることによる誤差を考慮しても実測値との差は少ない。このことから、切断力により果柄が圧縮される際に図 8 に示した切れ刃を逃がすために設けられた間隙に押し込む現象が発生し、切断終了（自由落下の開始）が遅れていると考えられる。

Fig. 11 Detail observation of cutting behavior. The solid line shows gap distance. Vertical dashed line according to each color shows completion time of cut off presumed from cutting force. Although each point of intersection are supposed to be gap distance 4mm, they are actually smaller by approximately 0.2 mm.

Table 5 Free fall.

Stem diameter	Free fall (measured)	Free fall (calculated)
1 mm	1.1 mm	1.31 mm
1.5 mm	0.4 mm	0.57 mm
2.3 mm	Couldn't observe	0.25 mm

6. 結 言

本研究では、太さにばらつきのみられる茎を対象とした収穫作業について調査し、収穫作業を切断と把持との動作に分けて考察し、これに基づいて構造が単純な切断後把持による収穫ハンドの設計法を提案した。電動モータを用いたロボットハンドでは限界のある閉じ込み速度をたわみの復元速度を利用して補い、自由落下で取り落とさない方法を明確にした。本研究によって設計製作された収穫ハンドは実際に宇都宮大学によるイチゴ摘み取りロボットに搭載され実証実験を繰り返しているが、イチゴを取り落とした事実は報告されていない。

他の作物の収穫においても、対象物の太さのばらつき調査を行い、摘み取り対象とする果柄の最大、最小値を決定し、さらに切断に必要な力の計測を行うことで、本提案の手法の応用が可能であると考え、今後の実験で実証していきたい。

謝 辞

本研究は平成 16, 17 年とちぎコンソーシアム事業の一部として栃木県の支援を受け行われました。また実験に用いた供試体は福田イチゴ園（宇都宮）様からご提供いただきました。ご支援いただきました皆様に感謝申し上げます。

文 献

- 有馬誠一, 近藤直, 八木洋介, 門田充司, 吉田裕一, 高設栽培用イチゴ収穫ロボット(第 1 報)5 自由度マニピュレータを用いた収穫ロボット, 植物工場学会誌, Vol.13, No.3(2001), pp.159-166.
- 崔永杰, 永田雅輝, 郭峰, 日吉健二, 木下統, 御手洗正文, マシンビジョンによる内成り栽培用イチゴ収穫ロボットの研究(第 2 報)採果用カメラによる熟度判定, 果柄認識及び採果ハンドの試作, 農業機械学会誌, Vol.69, No.2(2007), pp.60-68.
- 伏原肇, 林三徳, 柴戸靖志, イチゴの果重に及ぼす果数の影響, 九州農業研究, Vol.55(1993), p.191.
- 林茂彦, 雁野勝宣, 石井征亜, 田中逸夫, ナス収穫エンドエフェクタの開発, 植物工場学会誌, Vol.13, No.2(2001), pp.97-103.
- 林茂彦, 雁野勝宣, 黒崎秀仁, 有馬誠一, 門田充司, V 字型整枝されたナスを対象としたロボット収穫システム(第 2 報)ナスの収穫実験, 植物工場学会誌, Vol.15, No.4(2003), pp.211-216.
- Hayashi, S., Shigematsu, K., Yamamoto, S., Kobayashi, K., Kohno, Y., Kamata, J. and Kurita, M., Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test, Biosystems engineering, Vol.105 (2010), pp.160-171.
- 林茂彦, ナスのロボット収穫システムの開発に関する研究, 野菜・茶業試験場研究報告, Vol.16(2001), pp.187-234.
- Hayashi, S., Yamamoto, S., Saito, S., Ochiai, Y., Kamata, J., Kurita, M. and Yamamoto, K., Field operation of a movable strawberry-harvesting robot using a Travel Platform, Japan Agricultural Research Quarterly, Vol.48, No.3(2014), pp.307-316.
- 林茂彦, 山本聡史, 齋藤貞文, 山下智輝, 田中基雅, 坂本直樹, 柏原直哉, 菅野重樹, 内側収穫ロボットを用いたイチゴ果実への接近収穫方法の検討, 農業機械学会誌, Vol.74, No.4(2012), pp.325-333.
- Kondo, N., Yata, K., Iida, M., Shiigi, T., Monta, M., Kurita, M. and Omori, H., Development of an end-effector for a tomato cluster harvesting robot, Engineering in Agriculture Environment and Food, Vol.3, No.1(2010), pp.20-24.

- 熊倉裕史, 宋戸良洋, イチゴの果実肥大に及ぼす温度の影響, 園芸学会雑誌, Vol.62, No.4 (1994), pp.827-832.
- 尾崎功一, 農作物生産の最新技術 イチゴ摘みロボットの研究開発と実用化, 今月の農業 Vol.50, No.10(2006), pp.40-45.
- 田口喜祥, 入江直樹, 堀江貴雄, アスパラガス収穫ロボットシステムの開発, ロボティクス・メカトロニクス講演会講演概要集 2010(2010), 1A1-A24(1)-1A1-A24(2).
- Van henten, E.J., Hemming, J., Van tuijl, B.A.J., Kornet, J.G., Meuleman, J., Bontsema, J. and Van os, E.A., An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses, Autonomous Robots 13(2002),pp.241-258.

References

- Arima, S., Kondo, N., Yagi, Y., Monta, M. and Yoshida, Y., Harvesting robot for strawberry grown on table top culture (Part 1) Harvesting robot using 5 DOF manipulator, Journal of Society of High Technology in Agriculture, Vol.13, No.3(2001), pp.159-166 (in Japanese).
- Cui, Y., Nagata, M., Guo, F., Hiyoshi, K., Kinoshita, O. and Mitarai, M., Study on strawberry harvesting robot using machine vision for strawberry grown on annual hill top (Part 2) Ripeness judgment and recognition of peduncle using picking camera, and fabrication of the picking hand, JOURNAL of the JAPANESE SOCIETY of AGRICULTURAL MACHINERY, Vol.69, No.2(2007), pp.60-68 (in Japanese).
- Fushihara, H., Hayashi, M. and Shibato, Y., Effect of achene number on fruit weight of 'TOYONOKA' strawberry, Kyusyu Nougyou Kenkyuu, Vol.55(1993), p.191 (in Japanese).
- Hayashi, S., Ganno, K., Ishii, Y. and Tanaka, I., Development of a harvesting end-effector for eggplants, Journal of Society of High Technology in Agriculture Vol.13, No.2(2001), pp.97-103 (in Japanese).
- Hayashi, S., Ganno, K., Kurosaki, H., Arima, S. and Monta, M., Robotic harvesting system for eggplants trained in V-shape (Part 2) Harvesting experiment for eggplants, Journal of Society of High Technology in Agriculture, Vol.15, No.4(2003), pp.211-216 (in Japanese).
- Hayashi, S., Shigematsu, K., Yamamoto, S., Kobayashi, K., Kohno, Y., Kamata, J. and Kurita, M., Evaluation of a strawberry-harvesting robot in a field test, Biosystems engineering, Vol.105 (2010), pp.160-171.
- Hayashi, S., Study on the development of a robotic harvesting system for eggplants, Bulletin of the National Research Institute of Vegetables, Ornamental Plants and Tea (in Japanese), Vol.16(2001), pp.187-234 (in Japanese).
- Hayashi, S., Yamamoto, S., Saito, S., Ochiai, Y., Kamata, J., Kurita, M. and Yamamoto, K., Field operation of a movable strawberry-harvesting robot using a travel platform, Japan Agricultural Research Quarterly, Vol.48, No.3(2014), pp.307-316.
- Hayashi, S., Yamamoto, S., Saito, S., Yamashita, T., Tanaka, T., Sakamoto, N., Kashiwara, N. and Sugano, S., Study on an inside-approach harvesting robot for picking strawberries, JOURNAL of the JAPANESE SOCIETY of AGRICULTURAL MACHINERY, Vol. 74, No. 4(2012), pp. 325-333 (in Japanese).
- Kondo, N., Yata, K., Iida, M., Shiigi, T., Monta, M., Kurita, M. and Omori, H., Development of an end-effector for a tomato cluster harvesting robot, Engineering in Agriculture Environment and Food, Vol.3, No.1(2010), pp.20-24.
- Kumakura, H. and Shishido, Y., The effect of daytime, nighttime, and mean diurnal temperatures on the growth of 'Morioka-16' strawberry fruit and plants, Journal of the Japanese Society for Horticultural Science, Vol.62, No.4(1994), pp.827-832 (in Japanese).
- Ozaki, K., Nounsakumotsu seisann gijyutsu no saishinn gijyutsu Ichigo tsumitori robotto no kennkyuukaihatsu to jitsuyouka, Konngetsu no nougyou, Vol.50, No.10(2006), pp.40-45 (in Japanese).
- Taguchi, N., Irie, N. and Horie, T., Development of harvesting robots system for asparagus, The Robotics and Mechatronics Conference conference proceedings 2010(2010), 1A1-A24(1)-1A1-A24(2) (in Japanese).
- Van henten, E.J., Hemming, J., Van tuijl, B.A.J., Kornet, J.G., Meuleman, J., Bontsema, J. and Van os, E.A., An autonomous robot for harvesting cucumbers in greenhouses, Autonomous Robots 13(2002), pp.241-258.