

平成 21 年 4 月 20 日現在

研究種目：基盤研究 (C)

研究期間：2007～2008

課題番号：19560267

研究課題名 (和文) 三次元マジックハンドとその制御法

研究課題名 (英文) 3D Magic-Hand Manipulator and the Control Method

研究代表者

中川 秀夫 (NAKAGAWA HIDEO)

近畿大学・生物理工学部・准教授

研究者番号：60368371

研究成果の概要：一般的に、超多関節マニピュレータのような冗長系ロボットは逆運動学問題を解くのが困難で、また数値解析法の利用ではリアルタイムな制御ができない。そこで本研究では、三次元空間に一本の曲線を想定し、それにアームを沿わせることでマニピュレータの姿勢を構築するようにした。そのために、マニピュレータは、3自由度の関節ユニットをシリアル方向に連結した構造とした。そして各関節ユニットは、Z軸方向の伸縮とX/Y軸回りの屈曲が可能な3自由度を持つパラレルメカニズムを採用した。このパラレルメカニズムは閉リンク構造であり、剛性が高く、逆運動学解析が比較的簡単に求まる。この新しいマニピュレータについて機構解析し、また試作装置のコンプライアンス特性、位置決め精度などを測定した。その結果、本装置の実施対象である果実収穫作業への適用に有効であることを示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	800,000	240,000	1,040,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
年度			
総計	1,300,000	390,000	1,690,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・知能機械学・機械システム

キーワード：ロボティクス、パラレルメカニズム、機械要素、制御工学

## 1. 研究開始当初の背景

(1) 日本の農業従事者の高齢化は著しく進行し、農業従事者に占める65歳以上の割合は現在60%を超えている。果樹生産農家でも同様で、果実の自給率は年々減少傾向にある。平成14年度農業白書ではこうした点を捕えて、「果樹農家は樹園地の特性を踏まえた園地の再編・整備、機械化体系及び省力化技術の導入等により、低コスト省力的な果実生産体制の整備が重要」と指摘している。そこで

当地和歌山県の特産品である温州みかんの機械化に取り組むこととなった。

(2) その農作業の機械化は、大きく二分できる。一つは、作業者の操作により動作する機械を用いて農作業の軽労化を果たすもので、他方は、作業環境情報から適切な行動を自ら判断・選択して自律的に作業する機械を導入するものである。後者の機械は、前者のものと区別して「農業用ロボット」と呼ばれている。

て、将来的な需要の期待が高い技術である。こうして果実の収穫用ロボットの開発研究を行うこととした。

(3) 果実の収穫ロボットの研究は1980年頃から始まり、国内でもリンゴや夏ミカンといった大型の球状果実を対象とした収穫ロボットの研究が多くある。しかし、これらは果実一つひとつが点在し、重力で果梗部が鉛直方向に向いていて、ロボットにとっては比較的処理しやすい。これに対して温州ミカンには小型で群生し、果実方向も一様ではない。そのため、収穫用アームに産業用多関節ロボットを転用すると、樹冠内部にある果実にアプローチするとき、リンクが枝や幹に干渉し傷つけてしまうので適さない。そこで、周囲に干渉することなく果実にアプローチできる超多関節マニピュレータを新たに開発することとした。この機能は、二次元(直線)での伸縮により離れた場所にある対象物を取得できる玩具のマジックハンドに類似していて、これを三次元的に拡張して伸縮・屈曲させることができるようにしたマニピュレータ装置であることから、便宜上「三次元マジックハンド」と称している。

## 2. 研究の目的

周囲に干渉することなく伸縮して果実にアプローチできる超多関節マニピュレータを新たに開発し、その動作を実証することが目的である。超多関節(冗長)マニピュレータの研究は従来から数多く研究されているが、伸縮・屈曲のできる関節要素をシリアルに連結して超多関節マニピュレータを構成した考え方の研究報告は今までになかった。三次元マジックハンドは、伸縮することで動作エリアを最小することが可能で、果実の収穫ばかりでなく将来の発展が期待されている医療・福祉等の分野でも活用できる。

## 3. 研究の方法

(1) ハードウェアとしての三次元マジックハンドの設計・製作を行う。ユニットとしては、軸方向への伸縮と2方向への屈曲の合わせて3自由度が必要で、このユニットを7段積み上げた構造のものを製作する。ただし、出来るだけ簡素化する検討を行う。すなわち、各ユニットは3自由度を有しているから、3つの駆動アクチュエータが必要で、7段であれば $3 \times 7 = 21$ 個のモータとモータドライバが必要である。実用化を考えて、コンパクトで軽量化を重点に設計する。

(2) 超多関節マニピュレータの姿勢制御法を新たに考案する。6自由度を超える超多関節マニピュレータは、柔軟性に富んだ動作で、また干渉物回避ができることから、人間と共

存する環境や、狭い空間での作業用としての利用が期待されているが、一般的に逆運動学を解くのが困難で、姿勢制御も容易ではない。また数値解析等の利用ではリアルタイムで制御するのが難しい。そこで、三次元曲線に沿わせるように位置決めさせる新たな制御法を検討し、こうした考え方を実際にプログラミングして実証する。

## (3) 自重によるたわみ補正法の検討

三次元マジックハンドは3自由度ユニットを直列に積み重ねた構造であるから、自重によりたわみ、ハンドの計算位置と実際の位置に差異が生じることが懸念される。そこで、このたわみ量を補正し、指示位置に正確に位置決め出来る方法を検討する。

## 4. 研究成果

### (1) 装置の設計製作

初年度は試作機を設計・製作し、全体の基本特性を把握した。ユニットの構造を図1に示す。使用したねじ軸一体型ステッピングモータは、ボールベアリング両支持のロータ内に雄ねじを設け、これが出入りするシンプルな構造で、一般のモータを組込む際に必要となるモータブラケットやカップリング、ねじ軸支持のブラケット等が不要で、モータ自体も95gと軽い。特殊ねじによって高ねじ効率で推力も大きい。ねじ軸径5.0mmに対しリードは0.48mmのためリード角は1.75degと小さく、電源を切っても自重で落下することはない。推力は12V定電圧ユニポーラ駆動のとき40N以上である。

また、モータはステッピングモータであるから、モータドライバへのパルス指令のみのオープンループ制御が可能で、サーボモータのようにエンコーダ等のフィードバック用検出器が不要である。さらにステッピングモータでは、同一パルスでドライブすれば複数のモータを同期駆動できる。本マニピュレータ

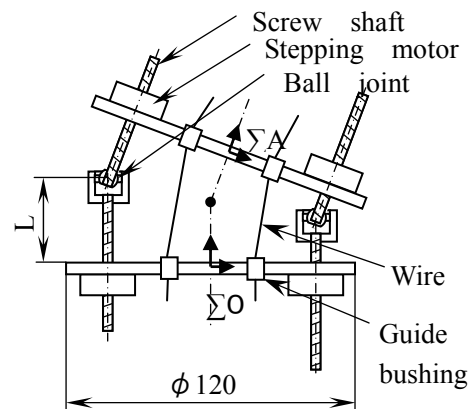


図1 ユニットの構造

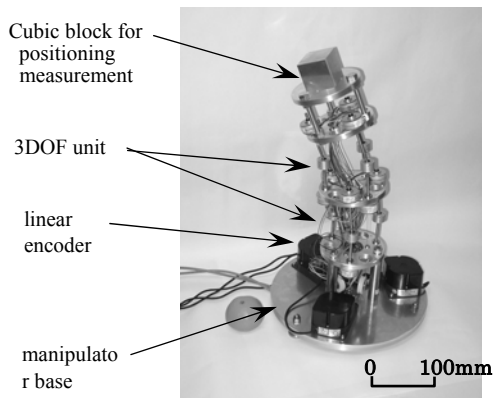


図2 実験装置写真

のように多くのモータを使用する場合、これらの軽減総量はマニピュレータ自重を軽くし、動作応答性を向上させるのに非常に有効なものと考えられる。図2は実験装置の概観で動作チェックのため2段ユニットの状態である。

(2) 制御法の考案

提案のマジックハンドを沿わせる仮想的な三次元曲線として、パラメトリック表現できる Ferguson 曲線を用いた。Ferguson 曲線の特徴は、始点、終点における位置・接線ベクトルの4つのパラメータで三次元曲線を定義できることである。しかも、本マニピュレータに適用した場合、始点は基本座標系の原点、接線ベクトルは鉛直方向で規定されるから、実質的には、先端点の位置、姿勢のみで定義される。したがって、終点(収穫ハンド)の位置・姿勢を指定すると一意的に三次元曲線形状、すなわちマジックハンドの形状が決定する。また、パラメトリック表記のため、 $t$ を  $0 \leq t \leq 1$  の範囲の媒介変数、マジックハンド

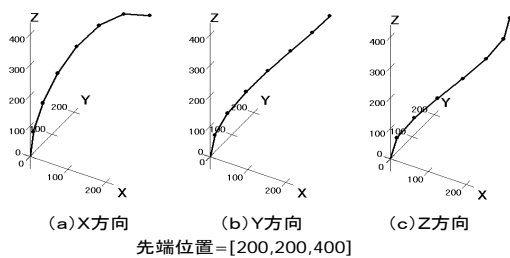


図3 三次元曲線計算結果

の段数を  $n$  とすれば、 $t=i/n (i=0, 1, 2, \dots)$  として連結部の位置・座標を求めることができる。この連結されたマジックハンド本体を、計算された曲線に沿った姿勢に形付けるには、パソコンで各アクチュエータの動作回転角を計算(逆運動学)し、同期制御のためのパルス分配処理計算を施す必要がある。この分配結果によって一定周期で各層のパルスモータ3個ずつ駆動して、それを各層に対し連続的に繰り返す。この制御プログラムをC++言語でプログラムし、動作制御を実現した。また、全アクチュエータを駆動すると、 $3n$ 軸の同時制御となり、またハードウェアも各モータの駆動用ドライバや角度検出器等の数も同等数必要で膨大となり、重量・容積・電力・コストの観点から適切でない。そこで、マニピュレータの主幹曲線を  $n$  個の折れ線で近似し、下段との相対位置に移動するような指令パルスパソコンで計算し、PIO出力から1つのドライバを通して1ユニットずつ駆動して上述の曲線に近づけ、第1段から順に出力を切り替えて先端まで行き、これを制御周期 500ms で繰り返す方式とした。パルス分配の方式は、数値制御の DDA 方式に準じて、パソコンにてプログラムした。したがって、必要最小限の同時3軸の切り替えで何段ものユニットを曲線に沿って動かすことができる。その結果、駆動ドライバも3台で済み、非常にコンパクトに出来た。図4はその装置写真である。

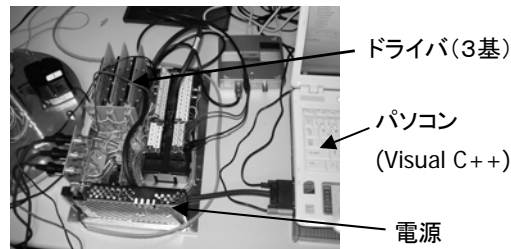


図4 ドライバとパソコン

(3) たわみ補正法

従来、重力方向に対するコンプライアンス特性を計測し、そこから自重に対する変位量予測量を計算することでたわみ補正を行なう方法を開発しているが、重力によるたわみも計算して補正するには不均一な要素が多す

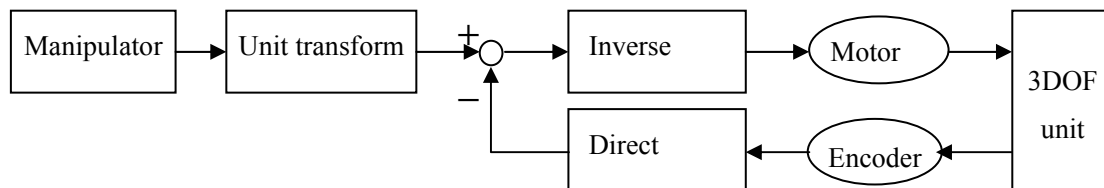


図5 フィードバックのブロック線図

ざる。新規に製作した実験装置に新たに組込んだワイヤーエンコーダ（先端位置の移動により内蔵のワイヤーが引張られ、その移動量が計測される）を利用したフィードバック制御を試みた。すなわち、マジックハンドの変形には1層ずつ動かすので、その他の層は固定状態とみなせ、ワイヤーの伸び量はその駆動層の変形量といえる。そこで、そのエンコーダの出力をパソコンに入力しフィードバック演算して先端部の位置決め精度を向上させようとするものである。

そのためには、図5のようなフィードバックブロック線図となるが、これらの実現には逆運動学変換だけでなく、順運動学変換も必要で、それについても検討したが、幾何学的にユニットの上下部分画面対称であることから容易に解が得られた。

#### (4) 先端点の位置・姿勢計測法

先端の収穫ハンドの位置に一边 50mm の研削立方体アルミブロックを取り付け、三次元測定器（ミットヨ BHN506）を用いた位置・姿勢を計測する方法を考案した。すなわち、図6のような立方体の上面の3点、側面の2点、それらの面と直角を成すもう1面の1点、合計6点の空間座標を求めることでそれらのベクトル計算から3平面の交点の位置座標と垂直線に対する回転角（傾き）を求める。6点のデータより測定ブロックの座標系の回転行列を求め、これから位置決め時の姿勢誤差、すなわちベース座標系のX/Y/Z軸に対するオイラー角 $\phi$ 、 $\theta$ 、 $\psi$ をそれぞれ求めた。

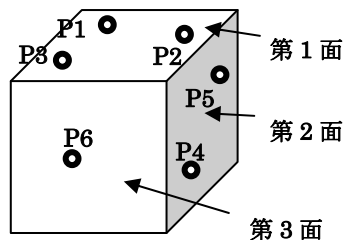


図6 位置・姿勢計測用キューブ

#### (5) 性能試験

##### ①コンプライアンス実測

マジックハンドの性能指標の一つである曲げモーメントに対する関節ユニットのコンプライアンスについて実測した。マジックハンドの先端にウェイトによる負荷を掛けて関節ユニットに曲げモーメントを与え、そのとき先端に取り付けた立方体ブロックの3面の中の6点を三次元測定機で位置測定した。図7は、重りの個数を変えることにより負荷量を増大させたときの先端点の位置と鉛直軸に対する傾きである。位置・

姿勢ともほぼ直線的に増加しており、関節ユニットが曲げモーメントに対してユニットのベースを回転中心として弾性変形していることを示す。この傾きより関節ユニットの曲げモーメントに対するコンプライアンスは、0.013rad/Nmと求められた。また、関節が伸縮することによりコンプライアンスが変化することが懸念されるが、図8のように負荷を6N一定に保ち、高さ(Z方向)を変化させて傾きを測定したが、ほぼ一定と見なせることが分かった。

##### ②繰り返し位置決め測定

試作装置の性能指標として繰り返し位置決め特性を測定した。縮小状態を原点としてX=20、Y=20、Z=40mmのポイントへの動作を指令する。この位置決め状態で先端のアルミブロックの位置・姿勢を測定し、再び原点の状態に戻し、これを10回繰り返す。この測定結果を図9に示す。指令値に対する最大誤差は、X軸方向で+1.0mm、Y軸方向で-1.4mmであるが、それ以外の値は誤差が±1.0mm以内であった。ミカンを収穫するという作業条件からすると、位置決め誤差は数mmは許容されると考えられるので、使用目的からの許容範囲内といえる。Z軸方向では最大値-2.6mmと大きく、指令値に対して振れ幅も大きい。目標値に達していないのは、重力の影響やウォームギヤのバックラッシュ等が原因と考えられる。

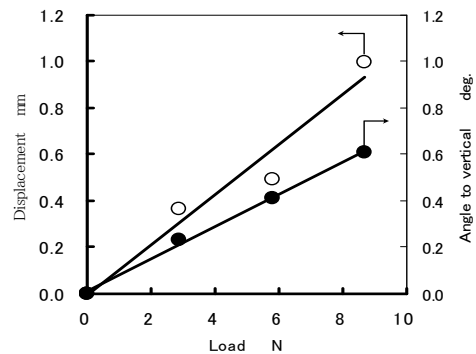


図7 負荷に対する測定点の動き

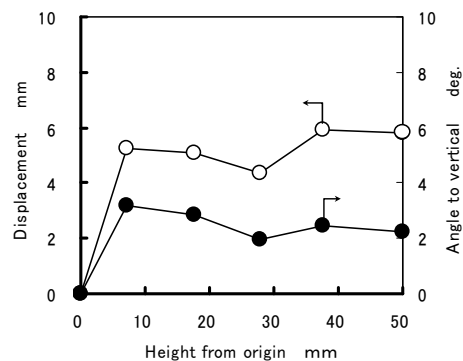


図8 原点からの高さの影響

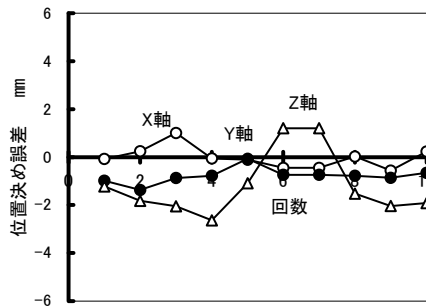


図9 繰り返し位置決め誤差の測定

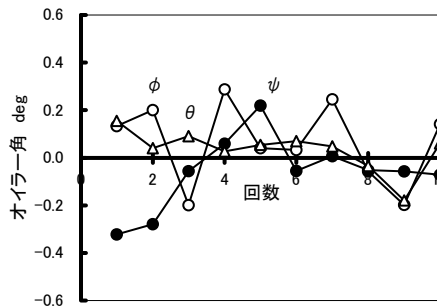


図10 位置決め時の姿勢の変化

次に図10にオイラー角の計算結果を示す。各オイラー角の最大誤差は±0.3deg以内で安定しており、許容範囲と考えられる±1.0deg以内となり果実収穫用ロボットアームとして使用できることがわかった。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計1件)

- ①中川秀夫、福田祐亮、パラレルメカニズムを連結した超多関節マニピュレーター三次元マジックハンドの機構と制御、近畿大学生物理工学部紀要、No. 22、pp. 71-78、2008、査読有

[学会発表] (計4件)

- ①中川秀夫、三次元マジックハンドの研究(第7報、フィードバックによる位置決め性能の向上)、日本機械学会関西支部第84期定期総会講演会、2009. 3. 17、近畿大
- ②中川秀夫、三次元マジックハンドの研究(第6報、フィードバックシステムと制御法)、日本機械学会2008年度年次大会講演会、2008. 8. 5、横浜国立大学
- ③中川秀夫、三次元マジックハンドの研究(第5報、ねじ軸を用いた機構の簡素化)、日本機械学会関西支部第83期定期総会講演会、2008. 3. 15、大阪大学

演会、2008. 3. 15、大阪大学

- ④中川秀夫、福田祐亮、三次元マジックハンドの研究(第4報、重力によるたわみの補正)、日本機械学会2007年度年次大会講演会、2007. 9. 10、関西大

[その他]

- ①近畿大学研究者データベース  
<http://rais.itp.kindai.ac.jp/researchdb/>

- ②近畿大学生物理工学部知能システム工学科HP  
<http://www.waka.kindai.ac.jp/tea/nakagawa/lab0.htm>

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

中川 秀夫 (NAKAGAWA HIDEO)  
 近畿大学・生物理工学部・准教授  
 研究者番号：60368371