

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 —— 三次元マジックハンドの機構と制御 ——

中川 秀夫¹、福田 祐亮²

要旨

本論文では、果実収穫ロボット用アームとして開発した、伸縮かつ屈曲のできる超多関節マニピュレータについて述べる。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で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。

1. 結論

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。

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⁽¹⁾。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。これに対して和歌山県の特産品の一つである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するため適さない。そこで本研究では、果実収穫用ロボットの基幹部品である収穫アーム（マニピュレータ）に着目し、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、著者らは便宜上「三次元マジックハンド」と称している。

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。従来の超多関

原稿受付 2008年6月26日

1. 近畿大学生物理工学部 知能システム工学科, 〒649-6493 和歌山県紀の川市西三谷930

2. 高園産業(株), 〒571-0038 大阪府門真市柳田町4-7

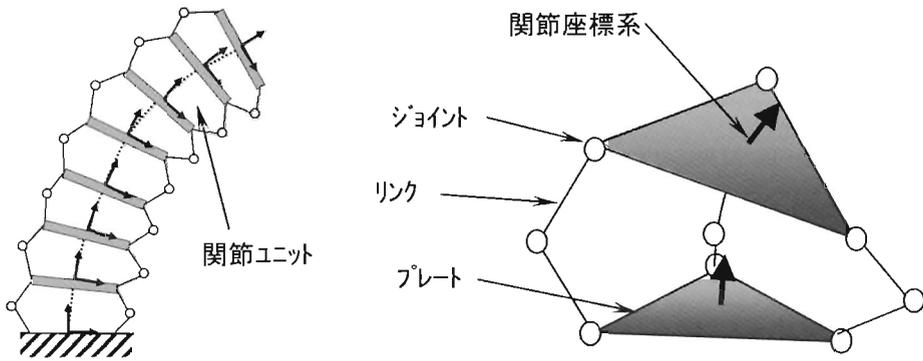


図1 マニピュレータ全体と関節ユニット

節マニピュレータの研究としては、たとえば小河原らの知的動作計画⁽²⁾や小金澤の逆運動学的高速解法⁽³⁾などがあるが、三次元マジックハンドに必要な伸縮量を制御するものではない。ここで提案するマニピュレータは、空間内に仮想的な三次元曲線を設定し、伸縮・屈曲によりそれに沿わせる方法のため、干渉を引き起こす従来のマニピュレータに比べて動作エリアを最小化でき、また比較的簡単な制御方法により動作させることが可能である。

2. マジックハンドの構成

2.1 マジックハンドの構造

装置の概略機構を図1に示す。3自由度パラレルメカニズムを1つのユニット(段)とし、それをシリアルに重ねて構成する。各ユニットは図に示すように、3組のリンクより支えられていて、独立に駆動する3個のステッピングモータが取り付けられている。ステッピングモータを駆動してウォームギヤによりこのリンク角度を開閉することによって、上部のプレート(すなわち、1段上のユニットの下部プレート)を傾けたり、プレートの法線方向に伸縮させることができる。最終端に収穫ハンドを取り付けるが、どの段を駆動してもハンドをX、Y、Z軸の3方向に移動できる。

2.2 主幹曲線

マジックハンドを構成する各ユニットの中心部を結んだ1本の主幹曲線を、パラメトリックに三次元曲線を表現できる Ferguson 曲線で描く。始点および終点の位置ベクトルをそれぞれ Q_0 、 Q_1 、接線ベクトルを \dot{Q}_0 、 \dot{Q}_1 とすると Ferguson 曲線は次のように定義される⁽⁴⁾。

$$F(t) = H_{00}(t)Q_0 + H_{01}(t)Q_1 + H_{10}(t)\dot{Q}_0 + H_{11}(t)\dot{Q}_1 \quad (1)$$

ここで、 $H_{00}, H_{01}, H_{10}, H_{11}$ は混ぜ合わせ関数と呼ばれ、

$$\begin{aligned} H_{00}(t) &= (t-1)^2(2t+1), & H_{01}(t) &= t^2(3-2t) \\ H_{10}(t) &= (t-1)^2t, & H_{11}(t) &= (t-1)t^2 \end{aligned} \quad (2)$$

で与えられる。 t は $0 \leq t \leq 1$ の範囲の媒介変数で、ここではマジックハンドの段数を n とすれば、

$$t = i/n \quad (i = 0, 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

として、各段の座標位置を求めることができる。

図2に、終端点座標が [200, 200, 400] の位置で、接線ベクトルが X/Y/Z 方向に姿勢を変えた場合の7段アームの曲線座標計算結果を示す。このときの伸展倍率は2.1倍であった。

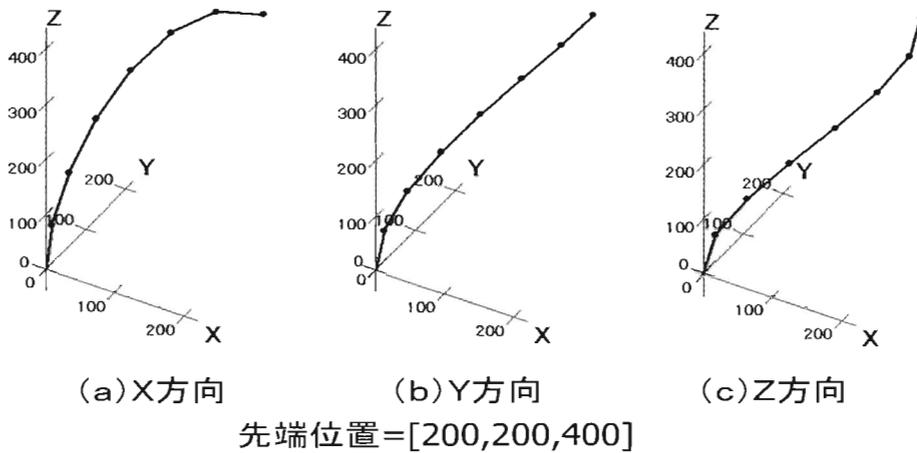


図2 主幹曲線の計算例（先端方向を変えて計算）

2.3 制御アルゴリズム

全アクチュエータを駆動すると、3 n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⁽⁶⁾に準じて、パソコンの VBA 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。

3. ユニットの構成

3.1 3自由度機構の構造

マジックハンドを構成するユニットは、1辺 60mm の正三角形の 2 枚のプレートに 3 組の 2 リンク機構で接続している。ユニットの仕様を表 1 に示す。この関節ユニットは閉リンク機構に属する 3 自由度の平行リンク機構である。閉リンク機構のリンク・関節数と自由度の関係を示す Grübler の公式によれば、自由度の総数 F は、

$$F = 6(l - j - 1) + \sum_{i=1}^n f_i \quad (4)$$

として表される⁽⁵⁾。ここで、 l はリンク数(ベースプレート、出力プレートを含む)、 j は関節の総数、 f_i は i 番目の関節の自由度である。出力プレートの自由度を 3 とするには、1 リンクの関節自由度の合計を 5 にする必要があるので、リンク構成はピンジョイント (自由度 1) を 2 組とロッドエンドベアリング (自由度 3) の組み合わせとした。この構造は、出力プラットフォームの回転方向の動きを抑制し、出力プレートの法線方向への伸縮と X/Y 軸回りの屈曲の 3 自由度運動ができる。

1 組のリンクの伸縮機構についての構造を図 3 に示す。上部リンクに取り付けられたステッピングモータ(バイポーラ、ステップ角 1.8deg、静止トルク 197mN・m)を回転させると、下部リンクに固定されたウォームホイールが減速比 1/30 で回転されて下部リンクが開き、リンク間距離 L を変化させることができる構造である。ウォームギヤの逆転防止機能により、ステッピングモータに通電しなくても姿勢を保つことができる。2.3 節で示した制御方法を実施するには、好都合の構造である。このリンクの頂点にピンジョイントを介して上層部の正三角形プレートを連結し、これを積み重ねてマニピュレータを構成する。

表1 関節ユニットの仕様

ユニットの屈曲角度	±25°
ユニットの短縮時高さ	36mm
ユニットの伸張時高さ	110mm
ユニットの直径	φ200mm
モータの最大静止トルク	12.7N・cm
ユニット質量 (モータ含む)	1.24 kg

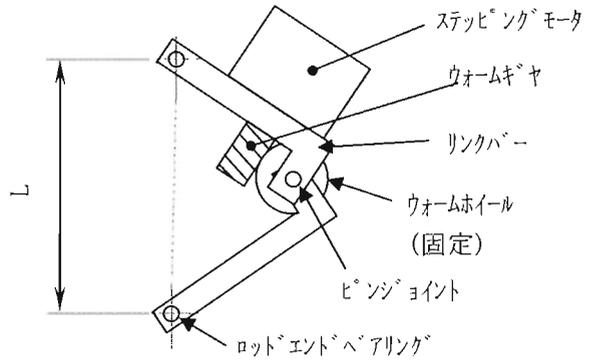


図3 リンク開閉機構

3.2 逆運動学方程式

出力プレート (プラットフォーム) の中心点のデカルト座標 $[x, y, z]^T$ が与えられたとき、アクチュエータ空間座標 $[\theta_1, \theta_2, \theta_3]$ を得る変換方程式(逆運動学方程式)を求める。

いま、出力プレート上の座標系 ΣA は、ベースプレート座標系 $\Sigma 0$ と重なった状態から、X 軸回りに角度 α 回転し、さらに回転後の Y 軸回りに角度 β 回転し、そしてその Z 軸方向に距離 L だけ平行移動したものとす。このときの ΣA の原点座標を $\Sigma 0$ の座標系で ${}^0[x, y, z]^T$ と表したとき、

$$\alpha = \text{atan2}(y, z) \tag{5}$$

$$\beta = \text{atan2}\left(x, \sqrt{y^2 + z^2}\right) \tag{6}$$

$$L = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \tag{7}$$

と求められる。ここで、 $\text{atan2}(\cdot, \cdot)$ は 2 変数逆正接関数である。

本ユニットの機構では、出力プレートとベースプレートの座標系の原点を結ぶベクトルは、常に出力プレートの法線方向、すなわち、座標系の Z 軸方向と一致する。Z 軸回りには回転しないこと、また、 α の回転方向に注意して XYZ オイラー角を適用すれば、 ΣA から $\Sigma 0$ への同次変換行列 0T_A は、次式で表される。

$${}^0T_A = \begin{bmatrix} \cos \beta & 0 & \sin \beta & x \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & \sin \alpha \cos \beta & y \\ -\cos \alpha \sin \beta & -\sin \alpha & \cos \alpha \cos \beta & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{8}$$

この同次変換行列を用いることで、ベースプレートと出力プレートを連結する 3 組のリンクの取り付け点間の距離 L_1, L_2, L_3 が算出できる。2 つのプレート上のリンク取り付け点は、座標系の原点を中心としてプレート上に半径 r の円を描き、その円周を 3 等分した点で、その位置ベクトルを p_i とすると、

$$L_i = \left| {}^0T_A \cdot p_i - p_i \right| \quad (i = 1, 2, 3) \tag{9}$$

このリンクのなす角度は、各リンクに取り付けられたアクチュエータ (ステッピングモータ) の回転によって変化される。2 つのリンクの長さをそれぞれ a, b 、ウォームギアの減速比を R とすると、リンクが作る三角形における余弦定理から、3 つのアクチュエータの回転角 θ_i は

$$\theta_i = R \cos^{-1} \left(\frac{a^2 + b^2 - L_i^2}{2ab} \right) \tag{10}$$

として求めることができる。

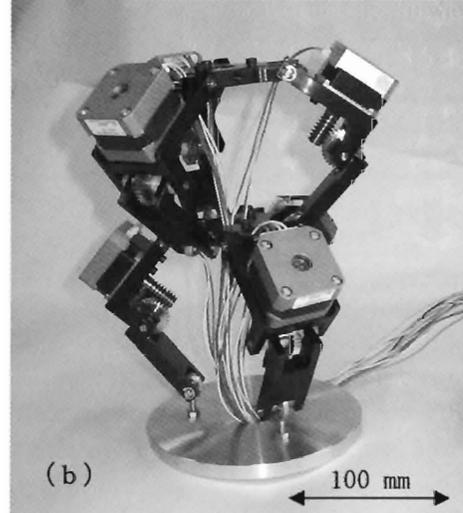
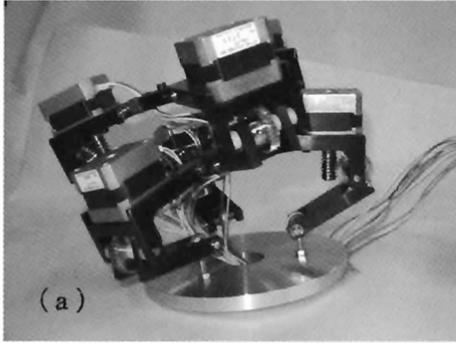


図4 試作のマジックハンド (2 段分)
(a)縮小時 (b)伸長時

4. マジックハンドの機能試験

2ユニットを積層した試作装置を製作した(図4)。下段ユニットの出力プレートが、上段ユニットのベースプレートとなっている。上下ユニットの干渉を回避するため、 60° ずつ Z 軸回りに回転させて取り付けられている。リンク材は構造用鋼(SS400)とした。

4.1 コンプライアンスの実測

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、積際ら⁽⁷⁾の方法⁽⁷⁾を参考に実測した。図5に示すような負荷方法で関節ユニットに曲げ

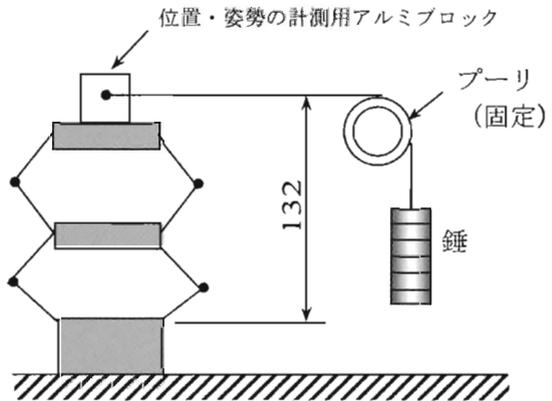


図5 ユニットのコンプライアンスを測定するためのセットアップ

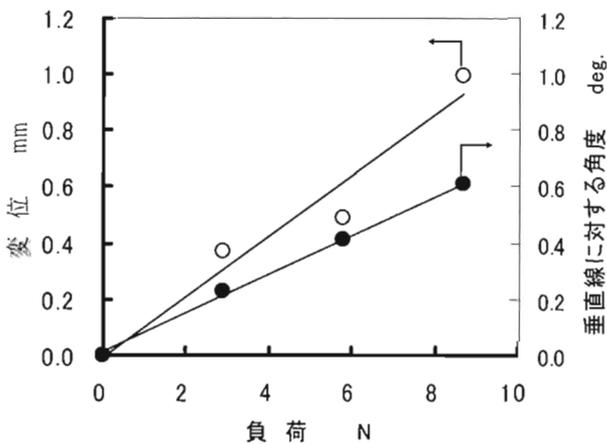


図6 負荷に対する測定点の動き

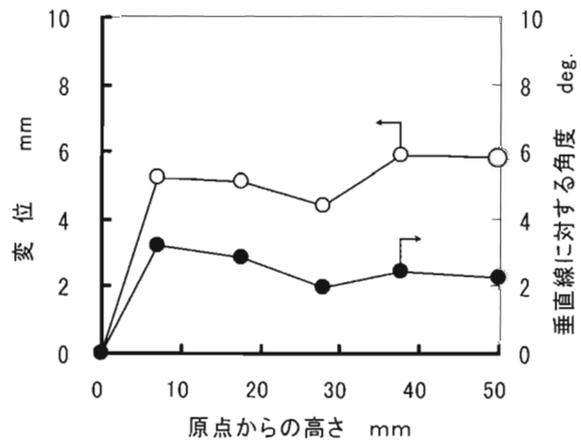


図7 原点からの高さの影響

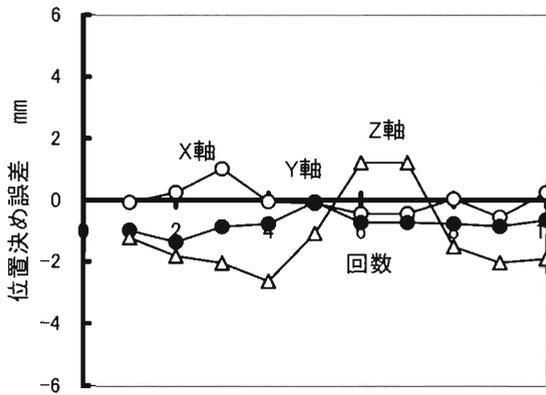


図8 繰り返し位置決め誤差の測定

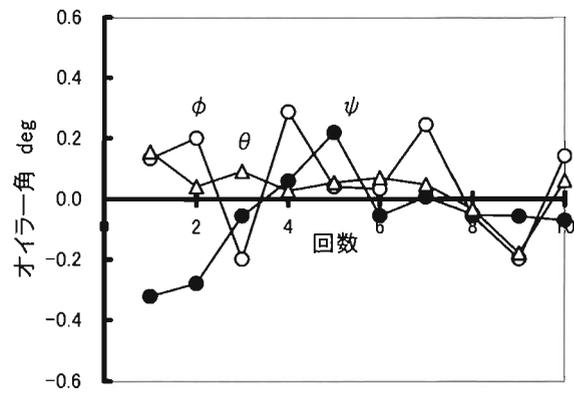


図9 位置決め時の姿勢の変化

モーメントを与え、そのとき先端に取り付けた研削アルミ製立方体ブロックの3面の中の6点を三次元測定機(ミットヨ BHN506)で位置測定して、それを演算することによりブロック中心点の位置座標と垂直線に対する傾き角を求めた。

図6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7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。

4.2 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。図4の(a)の縮小状態を原点として $X=20$ 、 $Y=20$ 、 $Z=40\text{mm}$ のポイントへの動作を指令すると、伸長して(b)のような形状を得る。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(a)の状態に戻し、これを10回繰り返す。この測定結果を図8に示す。指令値に対する最大誤差は、X軸方向で $+1.0\text{mm}$ 、Y軸方向で -1.4mm であるが、それ以外の値は誤差が $\pm 1.0\text{mm}$ 以内であり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が、簡略化を図ったオープンループ制御であることを考慮すれば許容される。さらに精度を向上させるには、たとえば重力補正法⁽⁸⁾のようなソフトウェア的な対応が有効と考える。

次に3次元測定機から得られた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 ϕ 、 θ 、 ψ をそれぞれ求めた。図9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 $\pm 0.3\text{deg}$ 以内で安定しており、許容範囲と考えられる $\pm 1.0\text{deg}$ 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分かった。

5. まとめ

作業周囲に対して干渉の少ない超多関節マニピュレータである三次元マジックハンドの基本的な機構、およびその制御アルゴリズムについて提案した。さらに、試作装置を設計・試作し、評価テストを行った。その結果、以下のことが明らかとなった。

- 1) 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 曲線が有効である。
- 2) マジックハンドの関節ユニットを、伸縮・屈曲のできる 3 自由度パラレルリンク機構とすることで、比較的容易に逆運動学が解けることを示した。
- 3) マニピュレータを駆動する方法として、下段ユニットとの相対的な動作を計算し、各ユニットを順次駆動する方法を提案し、試作装置にて動作を確認できた。
- 4) 2 段ユニットでの繰り返し位置決め測定では、垂直方向への位置決めに重力の影響が認められたが、その他の水平方向や姿勢誤差は十分に小さく、複数段での実用化が期待できる。

謝辞

本研究は、近畿大学生物理工学部知能システム工学科の学科戦略研究費（平成 17 年度特別配分枠）にて行われたものである。また、知能ロボティクス研究室の学部生諸氏の協力を謝意を表す。

参考文献

- (1) 近藤直、門田充司、野口伸（2006）農業ロボット(II)－機構と事例－、初版、pp124-133、コロナ社。
- (2) 小河原、中澤（1998）冗長パラレルマニピュレータの知的動作計画、機論 C、64-618、pp598-603。
- (3) 小金澤（1998）冗長自由度を有するマニピュレータの逆運動学の高速かつ安定な解法、日本ロボット学会誌、16-5、pp721-727。
- (4) 黒瀬能聿（1999）3次元図形処理工学、初版、pp33-36、共立出版。
- (5) 大岩孝彰（1998）パラレルメカニズムを用いた 3 次元座標測定器、精密工学会誌、64(12)、pp1791-1795。
- (6) 池辺潤（1971）数値制御通論、第 1 版、pp52-57、オーム社。
- (7) 積際徹、横川隆一、原敬（2003）多自由度を有する垂直多関節型ロボットのコンプライアンスの計測、機論 C、69-688、pp3293-3300。
- (8) 中川秀夫（2006）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 2006 年度年次大会講演論文集、No.04-1、pp149-150。

英文抄録

Super-multi Joint Manipulator linked up Units of Parallel Mechanism — Mechanism and Control Method of 3D Magic Hand —

Hideo Nakagawa¹ and Yusuke Fukuda²

The super-multi joint manipulator, which is able to extend and bend, is developed as an arm for the fruits harvesting robot. Generally, it is difficult to solve the reverse kinematics of a redundant robot like this super-multi joint manipulator and to make real-time control using the numerical solution for them. In this study, the manipulator is assumed to change its shape along an imaginary curve line calculated in the three-dimensional space. In order to make possible to extend or bend anywhere, it is composed of several joint units connected in series. Each joint has a parallel mechanism with three degree of freedom, i.e. extension into the Z axis and windings around the X/Y axes. This unit is a closed-loop linkage which has high stiffness and easy analyzability for the reverse kinematics.

The mechanism of this new type manipulator was analyzed, and the characteristic of compliance and positioning accuracy about the prototype device with two units were measured. As a result, it was confirmed that this device was useful for application to the fruits harvesting work.

1. Department of Intelligent Systems, Kinki University, Wakayama 649-6493, Japan

2. Takazono Corporation, Kadoma, Osaka 571-0038, Japan