CAD における 3 次元入力システム に関する研究*

——回転ベクトル直接入力法——

橋 本 正 治** 岩 田 一 明*** 梅 園 和 彦†

A Study of Three Dimensional Input System in Computer Aided Design (CAD)
- Direct Input Method by Using Rotation Vector -

Masaharu Hashimoto, Kazuaki Iwata and Kazuhiko Umezono

This paper describes the method to input the three dimensional information directly. When three dimensional model is constructed in CAD System, the position vector and rotation vector should be input. The input device which is designed in this study is able to input the rotation vector directly by new effective method. The primary factors which influence the accuracy of this device are the position of measuring point and the uniformity of speckle pattern in all measuring points. And to draw out the ability of this device enough, the three dimensional display system by using the method of binocular vision is developed. It is possible to operate as if the three dimensional model is gripped by hand when these devices were used together.

Key words: CAD, man-machine interface, rotation vector, speckle pattern, laser, binocular vision

1. 緒 言

近年, CAD システムの進歩は著しく, 広く実用に供せられている. CAD システムを利用して機械設計を行うには, 一般に設計者が CAD システムにデータや意思決定にかかわる各種の情報を入力しなければならない. 従来よりこれら情報の主な入力方法としては, 設計者がディスプレイ上で, 線, 面, 立体など, あらかじめ定められた要素を 2 次元の入力装置, タブレットやマウスなどにより入力する方法, 図面から認識される要素, 記号, 寸法などの情報を, キーボードより入力する方法, 三面図などの図面を直接入力する方法などが開発されてきた^{1) 2)}.

しかし, より効果的な CAD システムにおける設計

者と計算機とのインタフェースの開発は今後のシステムにとって不可欠であり, より一層の進展が望まれている. その具体的な方向の一つは設計者が情報を加工したり判断したりするのではなくて人間が馴染みやすい形式, 例えば, 身振り手振り, 絵, 話し言葉などで情報の入出力を行えることであると考えられる. この分野は疑似環境や人工現実感といった分野で研究されており³⁾, 例えばデータグローブやアイフォンなどが開発されている⁴⁾. しかし装着の煩わしさやディスプレイの解像度など克服すべき多くの問題点が残されている.

そこで, 本研究では CAD システムの入出力部のなかでも特に 3 次元の製品モデルを構築したり, その結果得られたモデルを操作する場合に限定し, 既存の CAD システムに導入できる実現可能性の高いインタフェースの開発を試みる. まず 3 次元入力システムとしての回転ベクトルの直接入力システムの基本的な考え方について述べた後, システムのハードウェアとソフトウェアの構成を説明する. その後, システムの精度と操作性の観点より評価を行うとともに, システムの有効性を検討する.

* 原稿受付 平成2年12月19日. 1989年度精密工学会
秋季大会学術講演会(平成元年11月6日)にて発表

** 正 会 員 摂南大学工学部 (寝屋川市池田中町
17-8)

*** 正 会 員 大阪大学工学部 (吹田市山田丘 2-1)

† 学生会員 摂南大学工学部

2. 回転ベクトルの直接入力システムの手法

本章では、CADシステムの入力部で行う作業を分析し、従来の入力装置による問題点を明らかにすると共に、3次元入力の一手法として開発した回転ベクトルの直接入力システムの原理について述べる。

CADシステムの入力部では、3次元の製品モデルを構築するために、点、線、面、立体の入力と、それらの移動、結合、削除などの編集作業が行われる。これらの作業は、位置ベクトル（3次元位置）、移動ベクトル（移動量、移動方向、移動の向き）、回転ベクトル（回転量、回転軸、回転の向き）の入力操作から構成される。以下に位置、大きさ、向きの入力に関する既存の装置及び従来の研究について述べる。

位置ベクトルの入力のために、従来のCADシステムでは、タブレット、マウス、トラックボール、ジョイスティック等が用いられているが、いずれも2次元の入力装置である。そのため、操作者は対応している座標系が(X, Y)(Y, Z)(Z, X)のいずれであるかを常に意識しなければならない。3次元座標を直接的に入力することにより、この負担は軽減されることから、3次元デジタイザ等が開発されてきた^{5)~7)}。移動ベクトルは、ベクトルの始点と終点を3次元デジタイザ等で指示することで、容易に入力することができる。回転ベクトルは回転量、回転の向きをロータリーエンコーダ等で入力し、回転軸をトラックボールやジョイスティックにより指示することで入力することができるが、単一の入力装置で回転ベクトル（回転量、回転の向き、回転軸）を入力することは困難である。

そこで本研究では入力の際の操作が実際に物体を回転させる操作と同じ感覚で行えるような単一の入力装置、すなわち3次元モデルをあたかも手でつかんで回転させるように操作できる3次元入力装置の開発を目的とする。このためには、手指の位置や屈曲角度を検出し手指による操作を認識する方法と、3次元モデルのある物体に対応させその物体の動きを測定することで必要な3次元情報（回転ベクトル）を求める方法が考えられる。手指の微妙な動作を非接触で測定することは困難であり、測定装置を手指に装着することによる肉体的及び精神的影響を考慮し、本研究では後者の方法を用いる。3次元モデルに対応する物体は任意軸回りの任意量の回転が可能でなければならない、支持のしやすさを考慮して球体（ボール）を用いる。

つぎにボールの回転ベクトルを測定する方法について述べる。図1に示すようにボールを回転させると測定点では回転量に応じた変位（測定ベクトル）が検出

Fig.1 Geometry of rotation vector

される。二つの測定ベクトルを $\mathbf{a}$ 、 $\mathbf{b}$ とすると、回転ベクトルは、中心を通り測定ベクトル $\mathbf{a}$ に垂直な平面 $\hat{\mathbf{a}}$ と、中心 O を通り測定ベクトル $\mathbf{b}$ に垂直な平面 $\hat{\mathbf{b}}$ 上に存在する。すなわち2つの平面 $\hat{\mathbf{a}}$ 、 $\hat{\mathbf{b}}$ によってつくられる交線が回転ベクトルの方向となる。回転ベクトル $\mathbf{r}$ の方向 $\hat{\mathbf{r}}$ は $\mathbf{a}$ 、 $\mathbf{b}$ の外積により次式によって求められる。

$$\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{a} \times \mathbf{b} / |\mathbf{a} \times \mathbf{b}| \quad (1)$$

回転ベクトル $\mathbf{r}$ の大きさ r は、測定点の位置ベクトルを $\mathbf{P}_0$ とすると、

$$r = |\hat{\mathbf{a}}| / |\hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{P}_0| \quad (2)$$

で表される。回転ベクトルの向きは次式のようになる

$$\mathbf{r} \hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{P}_0 = \mathbf{a} \quad \text{のとき} \quad \mathbf{r} = \hat{\mathbf{r}} r$$

$$\mathbf{r} \hat{\mathbf{r}} \times \mathbf{P}_0 = -\mathbf{a} \quad \text{のとき} \quad \mathbf{r} = -\hat{\mathbf{r}} r \quad (3)$$

しかし (a) 回転軸が2つの測定点を通る直線に平行な場合や (b) 回転軸がどちらか一方の測定点を通じた場合に測定ベクトルの外積を求めることができない。この欠点を補うために3つの測定点を用い、これによって生じるデータの重複を以下のように処理している

(a) の場合は、3つの測定ベクトルよりそれぞれの外積を求め、得られたベクトルの大きさの大きい方の1組を用いる。(b) の場合や、(a) と (b) が同時に発生した場合は、測定ベクトルの大きさが0となる測定点の位置ベクトルを $\mathbf{P}_0$ とし、式(1)の代わりに次式を用いて回転ベクトルの方向 $\hat{\mathbf{r}}$ を求める。

$$\hat{\mathbf{r}} = \mathbf{P}_0 / |\mathbf{P}_0| \quad (4)$$

3. ハードウェア構成

本章では、ボールの回転によって生じる3か所の測定点における変位を測定する方法について述べ、センサと信号処理回路および装置の構成について述べる。

3か所の測定点における変位は、ボールの回転に影響を与えないために非接触で測定を行わねばならない。

Fig. 2 Movement of speckle pattern

Fig. 3 Block diagram for sensor and signal processing circuit

測定は図2に示すように、半導体レーザ光をボール表面の測定点に照射して得られるスペックルパターンの移動を測定することによって行う。スペックルパターンはレーザの照射点（測定点）のボールの移動に応じて全体として一定の方向に動き、その移動量はボールの変位に相当する。スペックルパターンの移動は4分割されたフォトダイオードにより検出した。スペックルパターンの明るい点が各フォトダイオード上を、例えばy軸正方向に順次通過するとフォトダイオードから得られる信号は D_1 、 D_2 の順に時間的にずれて立ち上がる。ずれる順番により正負が定められ、通過する明るい点の数がy軸方向の変位 D_y となる。x軸方向の変位 D_x も D_1 と D_3 により同様に求められる。

図3にセンサ及び信号処理回路のブロック図を示し、図4に製作したレーザ駆動部及びセンサ部の概観写真、図5に入力装置の全景を示す。図5の装置内には、図4のレーザ駆動部及びセンサ部が3つの測定点にそれぞれ3組設置されている。装置の外部に取り付けられた回路は、フィルタ、レベル変換回路、及び波形整形回路である。以下にその詳細を示す。

Fig. 4 Laser drive circuit and detector

Fig. 5 Ball and measuring equipment

レーザ光源には半導体レーザダイオード（シャープ製、LT024MD、780nm、最大光出力30mW）を使用し、専用駆動IC（シャープ製IR3C01）により光出力20mWを得る。レーザ光はレンズにより30mm前方のボール表面上の測定点（焦点）に照射され、反射光の干渉によって得られるスペックルパターンを分割フォトダイオード（光電子製、HPI-1861、一辺140 μ mの正方形を対角線で4分割）により検出している。得られた信号は100倍に増幅された後ローパスフィルタによりノイズを除去し、レベル変換回路及び波形整形回路によりTTLレベルの矩形波に変換する。スペックルパターンの明るい点の移動方向を判断し、移動量を求めるためにロータリーエンコーダ用IC（NEC製、 μ PD4701AC）を使用し8bitのデータ（ D_x 、 D_y ）を得る。レー

Fig. 6 Local coordinate of measuring point

ザ駆動部、センサ部は3つの測定点それぞれに製作し、得られた3組の (D_x, D_y) はパラレルインタフェースを通して計算機(EPSON製, PC386)に入力し、測定ベクトルに変換(座標変換)した後、回転ベクトルを求める。得られた回転ベクトルを用いて3次元モデルを操作した結果はグラフィックディスプレイボード(フォトロン製, GT786, 画素数640×400)に表示し立体視装置を通して観察している。

4. ソフトウェア構成

本章ではセンサの信号処理回路により得られた3組のデータ (D_x, D_y) から3つの測定ベクトルを求め、さらに回転ベクトルを計算する手順について示す。

ボールの中心を座標原点としたときの3つの測定点 a, b, c を図6に示すように θ_x と θ_y で表す。また、各測定点の位置ベクトル P_a, P_b, P_c を延長した向きに z 軸を持ち、 XZ 平面に平行で Y 軸正方向に対して右向きに x 軸を持つ座標系 (x, y, z) を考え、測定データ (D_x, D_y) が (x, y) 座標値となるように分割フォトセンサを設定する。 xyz 座標系から XYZ 座標系への変換は、 x 軸まわりに θ_x 、 y 軸まわりに θ_y 、回転を行えばよい。したがって次式を用いることにより測定ベクトルを求めることができる。

$$[XYZ] = [xy0] \begin{vmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & C\theta_x & S\theta_x \\ 0 & -S\theta_x & C\theta_x \end{vmatrix} \begin{vmatrix} C\theta_y & 0 & -S\theta_y \\ 0 & 1 & 0 \\ S\theta_y & 0 & C\theta_y \end{vmatrix} \quad (5)$$

ここで、 $S\theta_x = \sin \theta_x$, $S\theta_y = \sin \theta_y$,

$$C\theta_x = \cos \theta_x, \quad C\theta_y = \cos \theta_y,$$

回転ベクトル r は、得られた3つの測定ベクトル a, b, c を用い、以下の手順により求めることができる。

STEP 1

$a = |a|$, $b = |b|$, $c = |c|$ を計算する。

STEP 2

a, b, c のいずれかが、ある値以下であれば(0であるとみなせれば)その測定点の位置ベクトルを P_0 に代入する。もし上記の条件が成立しなければ

$$A = a \times b, \quad A = |A|$$

$$B = b \times c, \quad B = |B|$$

$$C = c \times a, \quad C = |C|$$

を計算し、求めた A, B, C を比較し最も大きいものに対応するベクトルを P_0 に代入する。

STEP 3

$\hat{r} = P_0 / |P_0|$ を計算する。

STEP 4

a, b, c を比較し最も大きいものを c に代入し、対応する測定ベクトルを c に、対応する位置ベクトルを P_c に代入する。

STEP 5

$r = \hat{r} c / |\hat{r} \times P_c|$ を計算する。

STEP 6

$|r \times P_c - c| > c$ であれば、求めた回転ベクトルは逆向きであり、 $r = -r$ を回転ベクトルとする。ここで用いている測定ベクトルの大きさは、ボールの測定点における移動量そのものではなく、スペックルパターンの明るい点がセンサ上を通過した個数である。そのため、得られた回転ベクトルの大きさは、回転量に応じて変化するが、回転量そのものを示すものではない。本研究では、回転量を正しく求めるためにキャリブレーションにより求めたある値を回転ベクトル r に乗じることでこれに対処している。

5. 精度の評価

本章では、開発した3次元入力システムの精度に関して評価を行った結果について述べる。精度に影響を及ぼす要因として、以下のものが考えられる。

- (a) スペックルパターンの明るい点が測定点を通過する個数のカウントミス。
- (b) スペックルパターンの一様性。
- (c) 各スペックルパターンサイズの均等性。
- (d) センサ信号に含まれる電氣的ノイズ。
- (e) 計算誤差。
- (f) 測定点の位置。
 - (i) 設計した位置が高精度な測定を行うには不適切であるためによる誤差。
 - (ii) 製作誤差により設計した位置に正確に測定点が設置されなかったことによる誤差。
- (d) については、平均等の処理により対処できる。

Fig. 7 Speckle pattern

Fig. 8 Variation of speckle

(e)については、それ以外の精度への影響度に比例し無視できる量であったことから、以下では(a), (b), (c), (f)について考察する。

(a)について、ボール(直径100mm)を1回転させたときのカウント数を求め評価した。60回の実験の結果、1559パルス/回転(分散113.6)であった。図7にレーザ照射物体を0.02mmずつ移動したときに得られるスペックルパターンの変化例を示す。輝点は生成、移動、消滅を繰り返し、生成から消滅までの移動距離は図8のように得られた。本システムで用いたセンサよりも大きな輝点(0.1×0.1mm以上)60個について測定した結果、移動距離は平均1.2mmであり生成点や消滅点がセンサ上に偶然発生することが誤差に及ぼす影響は少ないと思われる。1回転の回転によるカウント数のばらつきの主な原因は、実験においてボールの回転が正確に再現されなかったためと思われる。しかし実用上は測定結果の回転ベクトルに誤差を含んでいても、表示物体の制御結果を目よりフィードバックし補正することで容易に目的を達することができる。ボールに触れない状態であっても振動によりカウント値が変化する場合が生じたが±1程度であり、カウント値の読取り時にリセットされるため、オーバカウント等も生じなかった。

輝点の生成から消滅までの移動距離は照射スポットの大きさに比例し、物体移動により新たな表面が照射スポット内に加わることでその面の情報を反映した輝

Fig. 9 Relation between measurement error and measuring position

点が生成し、逆にスポット内から外れる面によって消滅が生じていると考えられる。照射スポットの大きさは(b)のパターンの一様性にも影響を与える。本システムではスポット径に比較し、ごみや指紋が小さく、その影響が相対的に小さくなり、ボール表面のすべての範囲ではほぼ一样的結果が得られた。レーザ照射対象が限定されるため、ボール表面のいずれの照射スポットの範囲についても品位を均一にし、スペックルパターンの一様性を保持することは容易であると思われる。

(c)について最も大きく影響するのはボール表面上の測定点(レーザの照射点)から分割フォトセンサまでの距離であった。そのため3つのセンサ部における光路長がすべて同一になるように、製作には細心の注意を要した。使用した3つのレーザダイオードの波長の違いによるスペックルパターンの変化は、光路長による影響度に比較し無視することができる。

(f)の測定点の位置に関する要因の精度への影響を検討するために、以下のシミュレーションを行った。

- ① 回転ベクトルを与えたときに得られるであろう測定ベクトルを計算する。
- ② ①で求めた測定ベクトルに誤差を加え、逆に回転ベクトルを求める。
- ③ ①で与えた回転ベクトルと②の結果を比較し、誤差を求める。

以上の処理により(i)の測定点が適切な位置に設定されているかどうかを評価できる。回転ベクトルの方向を、2度刻みで全方向に変化させたときの誤差の平均値と、測定点の位置を定めるパラメータ θ_x , θ_y との関係を図9に示す。

②のかわりに、

②' 測定点の位置を定めるパラメータに製作誤差を加え、①で求めた測定ベクトルを基に、逆に回転ベクトルを求める。

を用いることで、(ii)の製作誤差が及ぼす影響を求めることができる。結果は図9とほぼ同様の分布を示した。以上の結果より、ボールの安定した支持が可能であり、かつ誤差が少ない点を測定点とし、 $\theta_x = 60^\circ$, $\theta_y = 120^\circ$ を採用した。

6. 操作性の評価

操作性の評価法として例えば3次元モデルを目的の位置、姿勢に移動させ、操作に要する時間によって操作性の評価を行う方法が考えられるが、この方法では、表示装置を含めた評価となる。その結果、3次元モデルが3面図によって表示されている場合は、操作者の3面図の認識能力に評価結果が左右されると思われる。本研究では上記の問題に対処するために立体視による表示装置を製作し、開発した入力システムの能力を十分に発揮させる対策を講じた。

本表示装置は3次元入力装置と同一計算機により制御されており、全体として3次元グラフィックディスプレイ端末としての入出力機能を備えている。そのため、マルチタスクで稼働する計算機上で動作するCADシステムで使用すれば、CADの操作に影響を及ぼすことなく、3次元モデルが記述されているデータファイルを参照し、立体視により表示されたモデルを、ボールを操作することで、任意の角度から観察することができる。本研究では入出力システムを制御する計算機上で動作するCAD (THIRDY, ASCII製)によって作られたデータを用い、立体視された3次元モデルを、ボールを用いて任意軸まわりに回転させることで、操作に関する評価を行った。

その結果、モデルのXYZ各軸まわりに回転を与えて意図した姿勢を実現する方法に比較し任意軸まわりにモデルを回転する方法の方がより人間の意図に沿った自然な操作感覚が得られた。

表示装置により本3次元入力装置の機能が十分に発揮されない場合が観察された。すなわち、三面図のみを表示して操作すると立面図と側面図と平面図の対応関係を見失う場合が生じた。しかし、立体視を用いた表示装置であればこのようなこともなく、本研究で開発した3次元入力装置を有効に使用するにはなんらかの

手法を用いた3次元表示装置が不可欠だと考えられる。

7. 結 言

本研究で得られた成果は次のようにまとめられる。

- (1) 開発した回転ベクトル直接入力装置は、3次元モデルをあたかも手でつかんで回転させるように操作することで、回転に関する3次元情報を入力できる。
- (2) 本装置の精度に影響を及ぼす、各スペククルパターンサイズの均等性については、ボール表面上の測定点から分割フォトダイオードまでの距離が重要であり、3つのセンサ部ではそれぞれ光路長を等しくすることが必要要件である。
- (3) 精度に影響を及ぼす測定点の位置について検討するためシミュレーションを行い、適正なレーザ測定点の領域があることが認められた。
- (4) 本装置の能力を十分発揮するために立体視による3次元表示装置を開発した。この表示装置と入力装置を併用することにより、操作者の意図に沿った自然な操作感覚を得ることが出来た。

参 考 文 献

- 1) K. Iwata and E. Arai: Input Information Processing System for Part Model from Coloured Hand-Written Sketch with Use of ITV, Ann. CIRP, 32, 1, (1983) 357.
- 2) K. Iwata, N. Sugimura and Woankyu Lee: Knowledge-based Recognition of Hand-written Drawings for Product Modeling in Machine Design, Proc. IFIP WG5.2 Working Conf., 2, (1987) 1.
- 3) 広瀬通孝: 人工現実感の生成, システム制御/情報, 33, 11 (1989) 590.
- 4) D. J. フォーレイ: 近未来のインタフェース, サイエンス, 12 (1987) 77.
- 5) 日経メカニカル, 4, 2 (1990) 98.
- 6) 安居院 猛ほか: 等角投影法を用いた立体形状入力システム, 情報処理学会論文誌, 28, 1 (1987) 20.
- 7) 阪本英男ほか: 靴用CADシステムにおける3次元カーソル機能の開発, 情報処理学会論文誌, 29, 12 (1988) 1151.