圧電素子駆動レーザトラッキングステーションを用いた 高精度空間座標測定システムの開発（第1報）*

— 微動トラッキングステーションの開発と性能評価 —

磯部浩已** 吉井孝平*** 内田信二† 久曾神 煌**

Development of High Accuracy Spatial Coordinate System Using Laser Tracking Station Actuated by PZT (1st Report)

— Development and Verification of Fine Motion Tracking Station —

Hiroimi ISOBE, Kouhei YOSHII, Shinji UCHIDA and Akira KYUSOJIN

Recently, it is required to improve the production efficiency and accuracy in the manufacturing factories, where many robots and manipulators are used. Therefore, it is required that the development of measuring method for position and attitude of moving objects with high accuracy. The main purpose of this study is to establish spatial coordinate measuring method using laser tracking station. In this method, spatial coordinates are calculated by the principle of triangulation from rotational mirror angles. However, the measuring accuracy of this method depends greatly on the mirror angle resolution. Thus, the laser tracking stations are combined with coarse and fine rotational mechanisms to achieve high accuracy spatial coordinate measurement over the wide range and dynamic measurement by using rapid-controlled-mirrors. The aim of this report is to realize the measurement error within $10\mu\text{m}$ in $1\times 1\times 1\text{m}^3$ working space which is a common requirement in manufacturing industry. As the first step, the fine motion mechanism with a two degree-of-freedom was developed. In order to track laser beams to the targets attached on the moving object, the three piezoelectric actuators control mirror angles with high speed and high accuracy. Operating the fine motion unit, the measurement error was less than $10\mu\text{m}$ for both one- and two-dimensional coordinates measurement with the distance of 1000mm between tracking station and target or more. It was confirmed that the measuring system was applicable for the manufacturing industries.

Key words: laser tracking, laser measurement, coordinate measurement, triangulation, piezoelectric actuator

1. 結 言

近年、ロボットなどを使用する生産現場において、生産効率の向上および高精度な製品加工の要求が著しく高まっている。そのため、ロボットマニピュレータ、工作機械などの空間内を移動する物体の位置や姿勢を高精度、かつ動的に測定する手法の開発が求められている。その測定法を大別すると接触式と非接触式がある。接触式は高精度な測定が可能である反面、軟質物体や高温物体などに対する測定は難しく、また動的測定には適していないなどの短所がある。これに対して非接触式は、測定物に影響を与えることなく測定が行えるため軟質物体・高温物体などの測定も可能であるとともに、動的測定にも適している^{1)~3)}。非接触測定方法の1つとして、三辺測量の原理を用い、被測定物にターゲットを取り付け、レーザ光にてターゲットを追尾し空間座標を算出する方法が提案されている¹⁾。しかしこの方法は、レーザ干渉計を複数台必要とするため製作コストがかさみ、また、現在のところ干渉計を回転する軸のぶれが測定誤差に大きく影響を与えている。

本研究では、三角測量の原理を用い、レーザ光の方向ベクトルからターゲットの空間座標を算出する方法を採用した。レーザ方向を制御するために、反射ミラーを多自由度回転機構に取り付けたレーザトラッキングステーションを使用する。この場合、座標測定精度はミラー回転機構の角度位置決め精度に大きく依存する。ここでは、広範囲測定のための粗動回

転機構と微動回転機構を組み合わせたレーザトラッキングステーションを提案し、これを用いた高精度空間座標測定システムを提案する。

本報においては、システムの構成、原理について述べ、第一段階として、微動レーザトラッキングシステムを試作し、その性能評価を行った。回転機構の案内部分に転がり軸受を用いた場合、高い回転精度は期待できず、多自由度機構を構築するためには複数の軸系を直列に積み重ねる必要があるもので、装置が複雑になる。一方、精密球を用いた球面ジョイントは高精度・小型化が期待されるが、非常に高価である。ここでは、弾性ヒンジを用いたリンク機構を用いることで、安価でかつ摩擦のない高精度多自由度微動トラッキングステーションを構築した。そして、高速、高分解能なトラッキングを行う。また、微動トラッキングステーションを用いて、微小空間に対する座標測定を行った。その結果、トラッキングステーションからターゲットまでの距離を1mとしたとき、測定誤差は $10\mu\text{m}$ 程度であった。また、移動するターゲットに追従するようにトラッキングステーションを制御することで、動的な測定も可能であった。以上の結果、本システムの工業的有用性が明らかとなった。

2. 原 理

本測定法は、図1に示すように2自由度のトラッキングステーションを二台使用してレーザ光の方向を制御し、三角測量の原理を用いることで、2つの直線の交点としてロボットなどに取り付けられたターゲットの空間座標を求めるものである。ターゲットには、どんな方向からレーザ光が入射しても、これを再帰反射する光学素子（レトロリフレクタ）を用いればよい。ミラーを高速に駆動する粗動回転①と、ミラー

* 原稿受付 平成11年9月2日

** 正 会 員 長岡技術科学大学工学部（長岡市上富岡町1603-1）

*** 大日本印刷㈱（東京都新宿区市谷加賀町1-1-1）

† ㈱小田原エンジニアリング（神奈川県足柄上郡開成町吉田島4289）

を高い分解能で駆動する微動回転②を組み合わせることで、高速で高精度、かつ動的な空間座標測定を可能にする。ターゲットに入射する2つの直線の方程式を求めるために、1) 空間上におけるレーザー光源の方向ベクトル、2) トラッキングステーションがレーザー光を反射する点の座標値、3) トラッキングステーションの姿勢情報が必要となる。

レーザー光源の方向ベクトルおよびトラッキングステーションの法線ベクトルを

$$l = (l_x, l_y, l_z)$$

$$n = (n_x, n_y, n_z)$$

とする。トラッキングステーションで反射されるレーザー光の方向ベクトル l_r は、以下のようになる。

$$l_r = 2 \frac{n \cdot (-l)}{|n|^2} n + l \quad (1)$$

となる。ここで

$$A_l = 2 \frac{n \cdot (-l)}{|n|^2} \quad (2)$$

と置き換えて l_r を成分で表すと

$$l_r = (An_x + l_x, An_y + l_y, An_z + l_z) \quad (3)$$

となる。トラッキングステーションがレーザー光を反射する点の座標値を $O(o_x, o_y, o_z)$ とすると、トラッキングステーションが反射したレーザー光の直線の式は以下のようになる。

$$\frac{X - o_x}{An_x + l_x} = \frac{Y - o_y}{An_y + l_y} = \frac{Z - o_z}{An_z + l_z} \quad (4)$$

もう一方のトラッキングステーションについても同様に反射レーザー光の直線の式を求められ、この2つの直線の交点を算出することで空間内におけるターゲットの座標値を求めることができる。ここでレーザー光源の方向ベクトルおよびトラッキングステーションがレーザー光を反射する点の座標値は、測定システムを設置した時点で定まるので、あらかじめ何らかの方法で測定しておく。これより、空間座標を算出するために測定すべき値は、2つのトラッキングステーションの法線ベクトルのみとなり、本測定システムで算出することができる。

3. 微動トラッキングステーション

3.1 構造

高精度な空間座標測定を可能にするためには、トラッキングステーションに取り付けられた反射ミラーの角度を、高速かつ高精度に位置決めする必要がある。そこで微動回転機構のアクチュエータとして、微小変位の制御に適した圧電素子を使用する。図2に微動トラッキングステーションの概略図を示す。引張りおよびせん断応力が圧電素子に作用するのを避けるため、圧電素子は弾性ヒンジを用いたホルダ内に圧入され、常に圧縮予圧が印加される。3個の圧電素子の変位を適宜制御することで、トッププレートはベースプレートに対して、 z 、 α および β 方向に変位する。ただし、トラッキングステーションに使用する場合、 z 方向変位は必要ない。トップ

Fig.1 3D coordinate measurement with laser tracking

(a) Schematic view of construction

Fig.2 Fine motion tracking station

プレートが α 、 β 方向に傾いた場合、発生する曲げ応力が反射ミラーをゆがめたり、多方向への干渉を引き起こす可能性がある。ここでは厚さ0.4mmのりん青銅板を弾性体として用い、これを $\phi 6$ mmのリングを介して圧電ホルダにボルトで固定し、 $\phi 12$ mmの円孔を持つトッププレートで挟み込むことで、リング状の弾性部分を設け、不要な応力を吸収する。

圧電素子変位からトッププレート変位への変換は、装置の幾何学的関係から求められる。各圧電素子の変位を列に並べた圧電素子変位行列を

$$D = [\delta_0 \quad \delta_1 \quad \delta_2]^T \quad (5)$$

とする。また、トッププレートの姿勢変化ベクトルを

$$M = [z \quad \alpha \quad \beta]^T \quad (6)$$

とした場合に、両者の関係は幾何学的に次の式で求められる。

$$D = A \cdot M \quad (7)$$

ただし、 A は次の式で表される。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 0 & \frac{1}{2}H_1 \\ 1 & \frac{1}{2}H_2 & -\frac{1}{2}H_1 \\ 1 & -\frac{1}{2}H_2 & -\frac{1}{2}H_1 \end{bmatrix}$$

ここで H_1 , H_2 は圧電素子の相対間隔を表し、それぞれ $H_1=32\text{mm}$, $H_2=44\text{mm}$ である。圧電素子の最大変位量は定格電圧100V印加時において $6\mu\text{m}$ である。従って、本微動トラッキングステーションの幾何学的な組合せから求められる理論的最大並進量および回転量は、 z 方向に $\pm 3\mu\text{m}$, α 方向に $\pm 136\mu\text{rad}$, β 方向に $\pm 188\mu\text{rad}$ になる。

3.2 駆動方法

圧電素子には入力電圧と発生する変位量との間にヒステリシスが存在する。本実験においては、トッププレートの多自由度変位の制御を、圧電素子の変位を制御量としたセミクロード制御系で行う（図3）。トッププレート上面にブロックゲージを貼り付け、それぞれの圧電素子と同一軸上に設置した静電容量型変位センサで測定し、圧電素子変位行列 D_i を得る。この伸縮量を用いてフィードバック制御を行い、圧電素子の変位量を正確に操作する。これらの制御は3つの圧電素子に対して個別に行われる。今回の実験でのサンプリング周波数は1kHzとした。

3.3 トラッキングステーションの性能評価

トラッキングステーションには高精度な位置決め特性が要求され、特に α , β 方向へ駆動したときの位置決め精度および他方向への非干渉性が重要である。ここでは、トラッキングステーションを z , α および β 方向へ駆動したときの静的位置決め精度と他方向への干渉を測定した。各圧電素子を $3.2\mu\text{m}$ ずつ変位させた状態を基準位置として、各方向へステップ送り駆動を行い、位置姿勢安定後に変位測定を10回行い、その平均値をプロットした結果を図4に示す。駆動範囲は z 方向に $\pm 3\mu\text{m}$, α 方向に $\pm 120\mu\text{rad}$ および β 方向に $\pm 165\mu\text{rad}$ とした。これより、トッププレートを α 方向へ駆動した場合、定常偏差の平均値は $0.0\mu\text{rad}$, その標準偏差は $0.2\mu\text{rad}$ となった。測定システムの測定分解能 15nm (x , y , z 方向)ならびに $0.5\mu\text{rad}$ (α , β , γ 方向)と比べると、ほぼ同程度の位置決め精度が得られていることがわかる。また、 β 方向への干渉量は $0.2\mu\text{rad}$ であり、測定分解能以内におさまった。次に β 方向へ

Fig. 4 Steady state errors for top plate travel

駆動した場合、 β 方向への偏り誤差は $0.0\mu\text{rad}$, 標準偏差は $0.2\mu\text{rad}$ となり、高精度な位置決めが確認された。多方向への干渉は測定系の分解能よりも小さくなった。ただし、 γ 方向への干渉が顕著に発生しており、その大きさは α 方向の変位に対して $0.02\mu\text{rad}/\mu\text{rad}$ である。これは、圧電素子ホルダの案内精度が悪いために、圧電素子の変位にともなう、トッププレートに γ 方向へ回転したか、もしくは測定対象面であるブロックゲージが、座標軸に対してミスアライメントを持っていることが原因だと考えられる。しかしながら、トラッキングステーションにおいて、 γ 方向への回転はミラーの法線軸回りの回転運動に相当し、空間座標測定には影響を与えないので、ここでは無視する。このトラッキングステーションを空間座標測定システムに適用した場合、測定精度は1m離れた地点において $0.4\mu\text{m}$ に相当する。

4. 座標測定システム

実際に3次元空間座標測定を行うために、測定システムを構築した。3次元座標測定を行うためには2台のトラッキングステーションを用いる必要がある。ここでは、第一段階として微動回転機構に平面ミラーを取り付けた1台のトラッキングステーションを用いて、微小範囲における1次元および2次元座標測定を行い、微動トラッキングステーションを用いた空間座標測定精度を検討した。

本研究で構築した空間座標測定システムの構成図を図5に示す。レーザ光源から出射されたビームは、 $1/2\lambda$ 板を通過して、偏光ビームスプリッタを直進し、 $1/4\lambda$ 板を通過し、トラッキングステーションで方向を制御され、ターゲットへと向かう。ターゲットとしては、コーナーキューブかキャッツアイを用いることができるが、本研究では比較的安価に入手できるコーナーキューブを採用した。反射したレーザビームは、偏光ビームスプリッタによって干渉フィルタへと向かう。

Fig.3 Attitude control system for tracking station

Fig.5 Coordinate measurement system

Fig.6 Calibration curve at Y=1000mm

そして、2次元ビームスポット位置検出装置（以後、PSD）に入射する。

PSDで得たスポット位置情報に基づき、ターゲットからの反射光の位置がPSDの中心と一致するようにトラッキングステーションの姿勢の補正量を計算し、各圧電素子の変位量を操作量する。トラッキングステーションの姿勢情報からターゲットの空間座標値を算出する。ターゲットの移動機構には、直交座標型3次元座標測定機（空間測定精度 $3.5+4L/1000 < 5\mu\text{m}$ 、最小指示値 $0.5\mu\text{m}$ ）を使用した。そして、プローブの代わりにターゲットを取り付け、3次元測定機の指示値をターゲット座標の真値とした。

測定システムに使用するレーザ光源には、時間的、空間的な安定性が要求される。本システムでは安定化He-Neレーザを用いた。レーザは、ファイバカップラと偏波面保存型ファイバを通過し、コリメータにより平行ビームとして出射される。ファイバを用いることでレーザ管の熱変形によるレーザ出射位置および角度の変動を減少させた。コリメータから1m離れた地点において、レーザ光スポット位置の変動を測定した結果、従来の装置では1時間に $\pm 25\mu\text{m}$ あった変動が、 $\pm 5\mu\text{m}$ まで減少した。

5. 空間座標測定精度評価

5.1 1次元座標測定精度

ターゲットをX方向（水平方向）に $\pm 250\mu\text{m}$ の範囲で移動させ、レーザ光を追尾させる。その時のターゲットの位置とトラッキングステーションの β 方向回転角との関係を求め、

Table 1 1D measurement errors

Distance to target in Y direction mm	Max. error μm	Standard deviation σ μm
800	3.6	1.5
1000	5.9	1.8
1500	6.5	2.1
2000	14.2	3.3

Fig.7 1D measurement error

校正直線とする。これを図6に示す。ここでは、3回の測定結果を重ねている。これより、微動トラッキングステーションの可動範囲内では、ターゲットの位置とトラッキングステーションの姿勢との関係は比例しており、この関係を最小二乗法で線形近似した場合の標準偏差 σ は $0.7\mu\text{m}$ であった。したがって、トラッキングステーションの角度情報から、ターゲット位置を高精度に算出できることが確認できた。

X方向に $\pm 250\mu\text{m}$ の範囲内において、実際の測定対象の動きを想定してターゲットをランダムに移動させ、その停止位置の1次元座標測定を3回連続して行った。図7はターゲットの位置と本測定システムによる測定値との差を示し、結果を表1にまとめた。誤差が正の方向に偏っていることから、校正直線を補正することで精度向上は期待できる。これより、本測定システムは1000mm程度離れた地点においても、ミクロンオーダーでの測定が可能であることがわかった。

5.2 2次元座標測定精度

トラッキングステーションからターゲットまでの距離 $Y=800, 1000, 1500\text{mm}$ の平面上において、測定範囲を $\pm 100\mu\text{m}$ に設定した。微動トラッキングステーションを α, β 方向に駆動して、レーザ光をターゲットに追尾させ、その角度情報からターゲットの空間座標を算出する。ターゲットは $50\mu\text{m}$ 間隔

Fig. 8 2D measurement error

で移動、固定を繰り返して測定を行った（図8）。各点の誤差の大きさと方向を図中矢印で示した。また、測定誤差の最大値および全測定点に対する標準偏差を表2にまとめた。これより、2次元測定においても、1次元の場合とほぼ同程度の測定精度が得られることがわかり、微動トラッキングステーションが2自由度測定に対しても高精度な測定が可能であることがわかった。

5.3 動的1次元座標測定精度

移動しているターゲットに対して、レーザを追尾させる動的1次元測定精度の評価を行った。ターゲットを水平方向に200μm移動させ、PSD上における反射レーザ光の位置を常に一定に保つようにトラッキングステーションの回転角度を動的に制御し、その回転角度情報からターゲットの位置を算出する。ターゲットの位置および本測定システムによる測定値との関係を図9に示す。ここでは、サンプリング周波数100Hzとし、ターゲットの移動速度は3次元測定器の最大移動速度0.8mm/sに設定した。実験結果から、測定誤差は±5μmに収まっており、動的にも高い測定精度が確認された。今後は、本測定システムで測定可能な最大移動速度について検討を行う必要がある。

Table 2 2D-measurement errors

Distance to target in Y direction mm	Max. error μm	Standard deviation μm
800	4.8	1.0
1000	6.8	1.6
1500	7.0	2.0

Fig.9 Dynamic 1D measurement

6. 結 論

空間内を非接触でかつ高精度・動的に座標測定を行うことができる、粗微動回転機構を用いたトラッキングステーション空間座標測定システムを提案した。

- (1) 安定化レーザ、光学素子、ターゲットの検討を行った結果、コリメータから1m離れた地点におけるレーザ光スポット位置のドリフトを±5μmまで減少させた。この結果、遠方にあるターゲットの位置を長時間安定して測定できるようになった。
- (2) 圧電素子駆動による微動トラッキングステーションを構築した。非常に安価で単純な構造でありながら、フリクションがなく高分解能・高精度を実現できた。空間座標測定において誤差の原因となる他方向への干渉も、測定器の分解能（0.2μrad）以下であった。
- (3) ターゲットから800～1500mm離れた位置における静的1次元および2次元測定において、測定誤差10μm以下を達成した。
- (4) 移動するターゲットに対して、動的に追尾・座標測定を行うことが可能であった。

謝 辞

本研究の一部は文部省科学研究費 基盤研究(C) No.09650161の奨励を受けて行われたことを付記し、謝意を表します。

参 考 文 献

- 1) 中村 収, 後藤 充夫, 豊田 幸司, 谷村 吉久, 黒澤 俊郎: 追尾式レーザ干渉計による座標計測システム, 精密工学会誌, 57, 5 (1991) 831.
- 2) 青柳 誠司, 岡部 佐規一, 佐々木 健, 高野 政晴: 超音波によるロボットの3次元位置・姿勢計測(第1報) - 計測原理と計測システムの構築 -, 精密工学会誌, 58, 5 (1992) 859.
- 3) 高辻 利之, 後藤 充夫: 追尾式レーザ干渉計によるロボットハンドの位置計測, 日本ロボット学会誌, 15, 2 (1997) 174.