レーザ干渉計による移動体の3次元位置・ 姿勢計測 (第2報)

—往復ビーム間に間隔を持つ3次元位置追尾計測法*

包 躍**・藤原 直史**・粟津 虎雄***

3D Position and Orientation Measurement of Vehicles Using a Laser Interferometer (2nd Report)

—3D Position Tracking Measurement Method with an Interval between Tracking Beam and Reflection Beam *

Yue BAO**, Naofumi FUJIWARA** and Torao AWAZU***

An LTS is a very flexible system that measures the 3D position of a moving target statically, dynamically and contactless, at a high sampling rate and automatically tracks the target in a large working space. However, the orientation measurement by LTS is difficult.

Authors developed an LTS which can measure orientation simultaneously with position measurement, but this method needs to keep an interval between the tracking beam from laser interferometer and the reflection beam from the reflector. This LTS can also reduce the influence of the interval quantity over the position measurement during tracking.

This paper proposes a 3D position tracking measurement method which can keep the interval and attains the 3D positions with a revision using the reflection beam. The effectivity of the new 3D position measurement method was confirmed by an experiment with the initial distance measurement method proposed in the previous report.

1. はじめに

3次元空間に移動する移動体やロボットの手先の位置を計測するため、超音波、レーザ、赤外線、カメラなどを利用するさまざまな方法が提案されている¹⁾⁻³⁾。そのなか、もっとも理想的な方法としてレーザ干渉計を用いた追尾計測システム (LTS) が知られている⁴⁾⁻⁵⁾。LTSは、計測の範囲、精度、速度などいずれも今までの工業用3次元計測システムより優れているため、位置計測用のものは、すでに商品化されている⁶⁾。しかし、現段階でのLTSは、位置算出に必要な初期距離計測を手動的に計測する必要がある、また移動体の誘導やロボットの手先位置の検査などに必要不可欠な姿勢情報を検出することができない問題がある。筆者らはこれらの問題点を解決可能な6自由度の自動LTSの実現を目指している。

本研究の第1報では自動的な初期距離計測法を提案

した。

LTSの姿勢計測法は多数提案されているが、ロール、ピッチ、ヨーを同時に計測できるのは反射光の断面画像を分析する方法しか見当たらない⁷⁾。この方法は、ターゲットとなるコーナキューブの各反射面の間の接線を明確にするように加工し、LTSによる追尾計測を行うとき、反射ビームを利用してそれらの接線のスクリーン上の投影をCCDカメラで撮像する。このイメージを画像処理すれば姿勢検出が実現できる。しかし、画像処理を基礎とする姿勢計測法は、高精度と高速度が両立できないという問題が避けられない。さらに、この方法ではコーナキューブがターゲットに固定されるため、コーナキューブの入射角範囲によって姿勢検出の範囲が制限される。

コーナキューブは、入射されるレーザビームをコーナキューブの中心に対して対称した位置で平行反射する性質を有する。そのため、コーナキューブの追尾は、コーナキューブに入射するレーザビームとコーナキューブの中心との間のズレを追尾偏差として検出し、それをなくするようにビームの方向を制御すれば実現できる。したがって、従来ではコーナキューブ上の追尾ビームの入射点とコーナキューブの中心とのズレ、つまり往復ビーム間の

* 原稿受付 1996年10月8日

** 金沢大学 工学部 Department of Mechanical Systems Engineering, Kanazawa University; 2-40-20, Kodatsuno, Kanazawa city, Ishikawa 920, JAPAN

*** YKK (株) YKK. Co; 200, Yoshida, Kurobe, Toyama 938, JAPAN

Key Words: laser tracking, interferometer, measurement, interval, revision.

Fig. 1 Equipment which reflects laser beams

ズレは計測誤差の一つとして扱われてきた^{2),5)-6)}。筆者らはこの往復ビーム間のズレを積極的に利用するリアルタイムの姿勢計測法を考案した。

Fig. 1にはこの方法の基本原則を示す。ビームスプリッターの作用によってポジションセンサ DA, DB はそれぞれコーナキューブの入射ビーム、反射ビームとそれらの等価平面 P_1 , P_2 との交点を検出できる。したがって、DA, DB の情報を用いて、それらの交点位置を変わらないようにジンバル台を制御すれば、コーナキューブの向きは常に入射ビームの方向へ向かうので、コーナキューブの姿勢は DA, DB の情報とジンバル台の回転角によって算出できる。

ポジションセンサ DA, DB は、それぞれ一つだけの光スポットを検出するため、ターゲットの姿勢を実時間で得ることができる。また、コーナキューブを常に入射ビームの方向に向くように制御するため、姿勢検出の範囲にも制限がない。しかし、この新しい姿勢検出法では、コーナキューブの入射反射ビーム、すなわち、往復ビーム間に間隔を有することが条件であり、追尾中その間隔量に変化するので、その変化の位置計測への影響を補正する必要もある。

本論文では、このようなリアルタイムな位置・姿勢計測システムを実現するため、まず、往復ビーム間のズレを固有情報として扱う移動体の3次元位置計測方法を提案する。そして、ターゲットの移動速度によって生じるズレ量の変化の位置計測への影響を自動的に補正できる追尾計測アルゴリズムを示す。最後に、前報で提案した初期距離計測法を利用した試作システムを用いた実験で

提案方法を検証し、その結果を報告する。間隔を有する往復ビームは最終的に実時間の位置・姿勢計測に使われるが、姿勢計測の詳細と実験結果は次報で報告する。

2. 計測システム

2.1 計測原理

Fig. 2 に示されたのは本論文で提案するレーザ干渉計を用いた3次元位置計測システムの概念図である。レーザ干渉計システムは、HP 社のレーザ測長計を用いた。He-Ne レーザ光源からのレーザビームは干渉計を経て、追尾ミラーに入射される。追尾ミラーは二つのステッピングモータによって駆動され、レーザビームを3次元空間で移動する移動体に向けて追尾する。

Fig. 2 Optical system for position measurement

移動体の代表点を中心位置とするコーナキューブからの反射光を検出するため、ビーム経路上にビームスプリッタを設置し、そこからの反射光をスクリーンに投射する。

$$e^T = \begin{pmatrix} 2\cos^2\zeta \cos^2\eta - 1 & \\ 2\sin\zeta \cos\zeta & \cos^2\eta \\ 2\cos\zeta \sin\eta & \cos\eta \end{pmatrix} \quad (6)$$

ベクトル e を法線とする平面 P_O は

$$x \cdot e = 0 \quad (7)$$

で表せるので、直線 ⑥ と平面 P_O との交点を A_2 とし、その位置ベクトル a_2 を求めると、

$$a_2 = a_1 - (a_1 \cdot e)/e \quad (8)$$

となる。

原点 O から移動体上のコーナキューブ中心 O_C の初期位置までの距離 r_0 は初期距離計測法で求められるので、レーザ干渉計の計測値であるコーナキューブの直線変位を ρ とすると、コーナキューブ中心 O_C の位置ベクトル o_C は次のように表せる。

$$o_C = a_2 + (r_0 + \rho)e \quad (9)$$

よって、変位量 ρ 、スクリーン上の受光点の位置 (D_{1y} , D_{1z})、追尾ミラーの角度 ζ , η 、初期距離 r_0 によって、コーナキューブ中心の位置を次式で算出できる。

$$o_C^T = \begin{pmatrix} -\tau \cos\zeta \cos\eta \\ + (r_0 + \rho)(2\cos^2\zeta \cos^2\eta - 1) \\ \frac{D_{1y}}{2} - \tau \sin\zeta \cos\eta \\ + 2(r_0 + \rho)\sin\zeta \cos\zeta \cos^2\eta \\ \frac{D_{1z}}{2} - \tau \sin\eta \\ + 2(r_0 + \rho)\cos\zeta \sin\eta \cos\eta \end{pmatrix} \quad (10)$$

ただし、

$$\tau = D_{1y} \sin\zeta \cos\eta + D_{1z} \sin\eta \quad (11)$$

である。

以上のアルゴリズムでは、往復ビームをそれらの中央に位置する一本の追尾ビームと見なす考えに基づいたものである。まず、このような追尾ビームが必ずコーナキューブの中心に当たるので、間隔を考えずに追尾が行われている場合の計算式を導出する。そして、それによる算出値にオフセットを加える。このような手順によって往復ビームに間隔を有する場合にもコーナキューブの3次元位置を簡単に得ることができる。また、ここで導出した(10)式を利用した2.4のミラー角度制御法を用いれば、往復ビーム間に間隔を保ちながら追尾することができる。追尾中、追尾偏差の位置計測への影響はコーナキューブから反射される反射ビームの位置 D_{1y} , D_{1z} によって自

動的に補正される。

2.3 初期距離計測

(10)式より、移動体の位置を計測するためには、初期状態における原点 O からコーナキューブまでの距離 r_0 をあらかじめ計測しておく必要がある。前報ではその自動計測法を提案したので、ここではそれを簡略化したアルゴリズムについて述べる。

Fig. 5 に示すように点 O_{C0} をコーナキューブ中心の初期位置、点 O を基準座標系の原点とする。

Fig. 5 Principle of initial length measurement

追尾ミラーの初期位置を点 O_P とする。レーザ干渉計による計測を開始してから、追尾ミラーの中心を O_P から O まで距離 l だけ移動させる。この間レーザビームを常に移動体上のコーナキューブに入射させ、計測を行う。このように得られた変位量を ρ とする。

追尾ミラーの中心とコーナキューブ中心を結ぶ直線の方角を表す角を α , β とするとき、 α , β は追尾ミラーの角度 ζ , η によって次式で表される。

$$\begin{cases} \alpha = \arctan\left(\frac{\cos^2\eta \sin 2\zeta}{2\cos^2\eta \cos^2\zeta - 1}\right) \\ \beta = \arcsin(\sin 2\eta \cos\zeta) \end{cases} \quad (12)$$

この式を用いて、追尾ミラーの中心が O , O_P にあるときの角度 α_0 , β_0 , α_P , β_P が得られる。

Fig. 5 において、線分 g と l は平行であり、 $\Delta O'_{C0} O O_P$ は $\Delta O_{C0} O O_P$ の xy 平面への正射影である。距離 l の移動によって生じる O_P から O_{C0} までの距離の変位量は ρ であり、距離 $a+b$ は距離 $l+c$ に等しいので、次式が成り立つ。

$$\begin{cases} a' = a \cos \beta_p \\ b' = b \cos \beta_p \\ c' = c \cos \beta_0 \\ \rho' = \rho \cos \beta_0 \\ a + b = l + c \end{cases} \quad (13)$$

xy 平面上の $\Delta O'_{C0} O O_p$ だけを見ると、各線分の幾何学的な関係により次の式が得られる。

$$\begin{cases} a' \sin \alpha_p = \rho' \sin \alpha_0 \\ g' = \rho' \cos \alpha_0 - a' \cos \alpha_p \\ \rho' + c' : \rho' = l : g' \\ a' + b' : a' = l : g' \end{cases} \quad (14)$$

(13),(14) 式より式の数はいくつあり、未知数は $a, a', b, b', c, c', g', \rho, l$ の九つである。これらを連立して解くことにより、初期距離 r_0 が次式で表される。

$$r_0 = \rho + c = \frac{\rho \sin \alpha_p \cos \beta_p}{\sin \alpha_p \cos \beta_p - \sin \alpha_0 \cos \beta_0 + \sin(\alpha_p - \alpha_0) \cos \beta_0 \cos \beta_p} \quad (15)$$

(15) 式よりわかるように、求められる初期距離に追尾ミラーの移動量 l は関係ない。ただし、精度には影響がある。

2.4 追尾ミラーの角度制御

移動体の位置計測を行うためには、移動体上のコーナキューブに対してレーザビームを追尾させなくてはならない。そこで、計測された位置からレーザビームを向ける方向を求めて、追尾ミラーの角度を制御する。

コーナキューブ中心の位置ベクトル o_C が得られたとき、次にレーザビームを向ける方向の目標となる単位ベクトルを e^* とすると、

$$e^* = \frac{o_C}{|o_C|} \quad (16)$$

$e^* = (e^*_x, e^*_y, e^*_z)$ とすると、目標回転角 ζ^*, η^* は次式で表される。

$$\zeta^* = \arctan \left(\frac{e^*_y}{e^*_x + 1} \right) \quad (17)$$

$$\eta^* = \arctan \left(\frac{e^*_z \cos \zeta^*}{e^*_x + 1} \right) \quad (18)$$

Fig. 6 に追尾システムの制御系を示す。時刻 k における追尾ミラーの角度が $\zeta(k), \eta(k)$ で、目標角度が $\zeta^*(k), \eta^*(k)$ である。 $u_\zeta(k), u_\eta(k)$ はそれぞれ $\zeta^*(k), \eta^*(k)$ に対する操作量である。追尾ミラーを回転させるために二つのステッピングモータを用いるものとしているが、ステッピングモータには分解能の制約があるため、追尾ミラーの角度を目標回転角に正確に合わせることはできな

Fig. 6 Control system of reflector

い。したがって、できるだけ目標回転角に近くなるように追尾ミラーを回転させ、次の時刻の追尾ミラーの角度 ζ, η を決定する。

3. 実験

3.1 実験方法と装置

提案方法の有効性を確認するため、3次元空間に移動するコーナキューブを追尾させ、コーナキューブが静止するときの位置計測と移動するときの位置計測実験を行う。実験において実験の再現性をよくするため、Fig. 7 に示すように、直線移動の単軸ロボットは3次元空間に傾いて設置し、コーナキューブをその上の移動台に取り付けて移動させる。実験に用いた単軸ロボットの位置決め標準偏差は0.0085[mm]以下である。また、追尾ビームを制御する装置としてはCCDカメラとステッピングモータを用いた。CCDカメラの画像取込ポートの分解能は512×486画素で、ステッピングモータのそれは0.0072°である。

Fig. 7 Experimental system

静止実験はFig. 7の始点Aから終点Bまでにいくつかの計測点に止めて計測を行う。移動時の計測実験は始点Aから終点Bまで、ほぼ一定の速度で移動させて位置計測を行う。さらに、この単軸ロボットの移動速度を少しずつ増加させていき計測精度を調べる。

2.2 で述べたようにLTSによる計測を行う前には、まず初期距離 r_0 を求める必要がある。

3.2 初期距離計測

本計測実験においては、Fig. 5に示された点 O_P に追尾ミラーの中心があるときの追尾ミラーの角度 ζ_p, η_p が、

$$\begin{cases} \zeta_p = 41.1480 & [\text{deg}] \\ \eta_p = -5.2380 & [\text{deg}] \end{cases} \quad (19)$$

追尾ミラーの中心を原点 O まで移動させたときの追尾ミラーの角度 ζ_0, η_0 が、

$$\begin{cases} \zeta_p = 33.0012 & [\text{deg}] \\ \eta_p = -4.2876 & [\text{deg}] \end{cases} \quad (20)$$

である。

この場合、レーザ干渉計から得られた変位量 ρ は次のようになる。

$$\rho = 211.33846 \quad [\text{mm}] \quad (21)$$

(19), (20) 式の値から点 O_P と点 O でのビーム方向を求めると、

$$\begin{cases} \alpha_p = 82.7737 & [\text{deg}] \\ \beta_p = -7.8694 & [\text{deg}] \end{cases} \quad (22)$$

$$\begin{cases} \alpha_0 = 66.2973 & [\text{deg}] \\ \beta_0 = -7.1837 & [\text{deg}] \end{cases} \quad (23)$$

となる。これらの値を(15)式へ代入すると初期距離 r_0 は、

$$r_0 = 588.34 \quad [\text{mm}] \quad (24)$$

と求められる。この後の位置計測実験ではこの値を用いる。

3.3 静止時の計測実験

計測結果から計測誤差を求めるには、計測点の真の位置が必要になるが、ここでは、それらを最尤推定法によって求める。

Fig. 8に示すように直線 AB 上に始点 A から約100[mm]間隔で終点 B まで10点定め、 $P_1 \sim P_{10}$ とする。

$P_1 \sim P_{10}$ の各計測点にコーナキューブを静止させ10回ずつ位置計測を行い、その平均値を求めて各計測点の位置とする。

Table 1は各計測点での測定値の平均値と標準偏差を示している。

単軸ロボット上のコーナキューブは直線移動を行うが、このときコーナキューブ中心が描く軌跡は次式の直線で表される。

Fig. 8 Measurement points

Table 1 Positions of measurement points

Measurement points	$\bar{x}_i$ [mm]	$\bar{\sigma}_{x_i}$ [mm]	$\bar{y}_i$ [mm]	$\bar{\sigma}_{y_i}$ [mm]	$\bar{z}_i$ [mm]	$\bar{\sigma}_{z_i}$ [mm]
P1	286.0	0.05	620.5	0.02	-74.0	0.03
P2	337.0	0.03	706.5	0.02	-74.1	0.02
P3	388.7	0.04	792.5	0.02	-73.9	0.02
P4	439.6	0.07	878.6	0.04	-74.1	0.02
P5	490.8	0.06	964.7	0.03	-74.8	0.03
P6	541.9	0.06	1050.6	0.03	-75.5	0.04
P7	593.0	0.07	1136.5	0.04	-75.7	0.05
P8	644.3	0.09	1222.5	0.04	-75.8	0.05
P9	695.5	0.06	1308.6	0.04	-75.9	0.04
P10	746.7	0.08	1394.7	0.04	-76.2	0.07

$$\begin{cases} y = ax + b \\ z = cx + d \end{cases} \quad (25)$$

計測点 P_i での各座標の平均値を $\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i (i=1, 2, \dots, 10)$ とし、真の値を x_{io}, y_{io}, z_{io} とする。このとき座標 $(\bar{x}_i, \bar{y}_i, \bar{z}_i)$ には誤差が含まれており、点 (x_{io}, y_{io}, z_{io}) とは一致しない。この平均値の表す点と真の値の表す点との距離 e_i を次式で表す。

$$e_i = \sqrt{(\bar{x}_i - x_{io})^2 + (\bar{y}_i - y_{io})^2 + (\bar{z}_i - z_{io})^2} \quad (26)$$

移動体位置の測定値は真値を中心とした正規分布をなすと仮定すると、距離 e_i は平均値0、標準偏差 $\sigma_{e_i}^2$ に従う。また、分散 $\sigma_{e_i}^2$ は各計測点における計測データから求められる。

すべての計測点について真の位置からの距離が e_i となる確率の積をとり、次のように尤度関数 T を定義する。

$$T = \prod_{i=1}^{10} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_{e_i}}} \exp \left\{ -\frac{(e_i - e_{io})^2}{2\sigma_{e_i}^2} \right\} \quad (27)$$

この尤度関数 T の値が最大となるときの a, b, c, d と x_{io}, y_{io}, z_{io} の値が、それぞれ求める軌道の係数と各計測点での真の値の最尤推定値である。

ここで、点 (x_{io}, y_{io}, z_{io}) は直線 (25) 上の点であるから

$$\begin{cases} y_{io} = ax_{io} + b \\ z_{io} = cx_{io} + d \end{cases} \quad (28)$$

となる。

(27) 式へ (26), (28) 式を代入して、その指数部を a, b, c, d, x_{io} でそれぞれ偏微分した値を 0 とすると、 a, b, c, d についての正規方程式および、 x_{io} と a, b, c, d の関係式が得られる。これを整理すると、以下ようになる。

$$\begin{cases} A = \sum_{i=1}^{10} \frac{x_{io}^2}{\sigma_{ei}^2}, & B = \sum_{i=1}^{10} \frac{x_{io}}{\sigma_{ei}^2}, & C = \sum_{i=1}^{10} \frac{1}{\sigma_{ei}^2}, \\ D = \sum_{i=1}^{10} \frac{x_{io}y_i}{\sigma_{ei}^2}, & E = \sum_{i=1}^{10} \frac{y_i}{\sigma_{ei}^2}, & F = \sum_{i=1}^{10} \frac{x_{io}z_i}{\sigma_{ei}^2}, \\ G = \sum_{i=1}^{10} \frac{z_i}{\sigma_{ei}^2}, & \Delta = AC - B^2 \end{cases} \quad (29)$$

とおくと、

$$\begin{cases} a = \frac{CD - BE}{AE - BD} \\ b = \frac{AE - BD}{CF - BG} \\ c = \frac{CF - BG}{AG - BF} \\ d = \frac{AG - BF}{\Delta} \end{cases} \quad (30)$$

$$x_{io} = \frac{x_i + a(y_i - b) + c(z_i - d)}{1 + a^2 + c^2} \quad (31)$$

となる。

(30), (31) 式を用いて繰り返し計算を行うと、

$$\begin{cases} a = 1.6817, & b = 139.1 \\ c = -0.0054715, & d = -72.7 \end{cases} \quad (32)$$

と係数が求められる。

これらの係数を (25) 式に代入することによって、移動体の直線軌道の方程式が得られる。

以上の直線方程式と (31) 式を用いて、各計測点の真の位置の推定値として (x_{io}, y_{io}, z_{io}) が求められる。Table 2 に示されたのはこれらの推定値と実測値との比較で得られた各計測点の推定計測誤差である。

3.4 追尾計測実験

直線移動する移動体の移動速度を変え、追尾計測実験を行った。移動体の移動速度は単軸ロボットのモータの回転速度を変えることで設定できる。実験に用いた移動速度は 20.0[mm/s] から 60.0[mm/s] までである。

実験結果から位置計測誤差を求めるために、3.3 で求めた直線軌道と、設定した移動速度を用いて移動体の真

Table 2 Maximum errors of measurement points
(Corner cube stands still)

Movement points	$ \Delta x $ [mm]	$ \Delta y $ [mm]	$ \Delta z $ [mm]
P ₁	0.28	0.13	0.32
P ₂	0.15	0.12	0.14
P ₃	0.15	0.11	0.41
P ₄	0.20	0.08	0.53
P ₅	0.20	0.09	0.09
P ₆	0.15	0.06	0.37
P ₇	0.14	0.05	0.35
P ₈	0.21	0.13	0.21
P ₉	0.13	0.10	0.17
P ₁₀	0.24	0.016	0.18

の位置を推定する。この推定値と計測値の差を位置計測誤差とする。ただし、移動体が加速中と減速中は、移動速度が設定された値ではないので、誤差の計算は行わない。つまり、1000[mm] 移動する移動体の位置計測を行い、その加速終了時刻から減速開始時刻までの位置計測誤差を調べる。

Table 3 に位置計測誤差の最大値を各座標軸について示している。また、Fig. 9 と Fig. 10 はそれぞれ移動速度が 20.0[mm/s] と 60.0[mm/s] の場合の計測結果と最大誤差の発生位置を示したものである。

Table 3 Maximum errors of measurement points
(Corner cube is moving)

Movement Speed [mm/s]	Time of acceleration ending[s]	Time of Deceleration Beginning[s]	Maximum errors		
			$ \Delta x $ [mm]	$ \Delta y $ [mm]	$ \Delta z $ [mm]
20.0	0.35	50.03	1.4	1.2	0.8
30.0	0.62	33.58	1.5	1.5	0.9
40.0	0.71	25.14	1.0	0.7	0.8
50.0	0.99	20.20	1.8	1.7	0.9
60.0	1.19	16.90	1.5	1.6	0.9

LTS は目標までの距離と方向、すなわち極座標系を用いて位置計測を行う。干渉計から得られた変位データの精度は極めて高いので、位置計測の精度は初期距離の精度と追尾ミラーの角度分解能に依存する。そのため、角度分解能が一定な場合、距離が遠くなるほど追尾ビームの入射点とコーナキューブの中心位置とのズレが大きくなり、計測誤差が大きくなる。この問題を解決するため、提案手法では、現在のビーム方向に反射光で検出した追尾ビームの入射点とコーナキューブの中心との間のズレ量を加えてコーナキューブの中心方向を決定する。コーナキューブの特性により、距離が遠くなると追尾ビーム

に対する反射ビームのズレ量も大きくなるが、このズレ量を位置算出に導入することにより、極座標系の角度による誤差を小さくすることができる。

また、移動体の移動速度を上げると、追尾偏差も大きくなるが、同様な理由で Fig. 9, 10 の結果から、提案アルゴリズムによる計測では、位置計測値にほとんど影響しないことがわかる。

今回の実験では、レーザ光源と受光器の間隔は 11[mm] で、反射光から見た追尾偏差は 0.5[mm] 以内であった。

また、追尾ビームと反射ビームはコーナキューブに対して中心対称かつ平行にするため、姿勢計測を行うとき、追尾偏差は Fig. 1(a) に示す DA, DB 上に同じ大きさで同時に検出される。したがって、それらの差を取ることで姿勢計測への影響を取り除くことができる。しかし、レーザ干渉計の受光口の大きさが制限されるため、反射光は受光口から外れると計測ができなくなるので、速度の大きい移動体に対応できるシステムを構築するには、高度な追従性が要求される。

Fig. 9 Experiment results in case of movement speed is 20[mm/s]

Fig. 10 Experiment results in case of movement speed in 60[mm/s]

4. おわりに

LTS は高速度、高精度、大範囲の計測特性を有するため、将来性のある汎用計測器として期待されている。しかし、姿勢計測は困難なことから筆者らはリアルタイムの姿勢計測ができる 6 自由度の LTS の開発を行っている。本論文では、この新しい LTS を実現させるための位置計測システムと追尾計測アルゴリズムについて提案した。そして、その有効性を実験で確認した。その内容を要約すると次のようになる。

- ① 従来 LTS はリアルタイムで高精度な移動体位置を計測することができるが、手動初期距離計測とリアルタイムな姿勢計測ができないという問題がある。本研究はこの問題を解決できる 6 自由度の自動 LTS の実現を目的とする。
- ② 画像処理による LTS の姿勢計測法が提案されているが、計測の範囲が制限され、高速化と高精度化が両立できないため、筆者らは追尾ビームを直接利用するリアルタイムな姿勢計測法を考案した。

- ③ この新しい姿勢計測法を実現させるため、往復レーザービームの間の間隔を保ちながら3次元位置を連続的に計測できることが条件である。本論文はそのシステムと追尾計測アルゴリズムを提案した。
- ④ 追尾中、追尾レーザービームと反射レーザービームとの間の間隔が常に変化するが、新しい追尾計測アルゴリズムを用いれば、その間隔の変化による位置計測への影響が自動的に取り除かれる。
- ⑤ 試作システムによる実験の結果、提案システムの有効性が確認された。これにより、リアルタイムの姿勢計測に適するLTSの位置計測法が確立され、6自由度の新しいLTSの実現が可能となった。本論文は6自由度LTSの3次元位置計測法と追尾手法について検討した。それを基礎とした姿勢計測法は次報で報告する。

plication of measurement data to system calibration; *IFTToMM-jc International Symposium on Theory of Mechanisms*, pp. 205–210 (1992)

参考文献

- 1) 馬, 下河辺: 超音波による三次元座標測定; 精密工学会誌, Vol. 54, No. 12, pp. 145–150 (1988)
- 2) 津村, 橋本: レーザとコーナキューブを用いた移動体の能動位置計測のためのレーザ追尾手法; 計測自動制御学会論文集, Vol. 23, No. 10, pp. 1017–1023 (1987)
- 3) D. Clare and S. Theodore: Infra-red location system for navigation of autonomous vehicles; *Proc. IEEE Int. Conf. Robotics and Automation*, pp. 1236–1241 (1988)
- 4) 藤原, 包, 音島, 栗津: レーザ変位計を用いた三次元空間における移動体の位置計測; 第7回アドバンティ・シンポジウム, pp. 61–64 (1994)
- 5) K. Lau, R. J. Hcken and W. C. Haight: Automatic laser tracking system for robot metrology; *Precision Engineering*, No. 8, pp. 3–12 (1986)
- 6) SMART301, LEICA 社カタログ (1995)
- 7) M. Vincze, J. P. Prenninger and H. Gander: A six degree of freedom robot measurement system III: Ap-