文章编号: 1001-3806(2002)03-0214-03

扫描激光位置和姿态测量算法及实验研究

朱大勇 王 莹 王 伟
(电子科技大学光电子技术系, 成都, 610054)

摘要: 对空间飞行器交会对接过程中的扫描激光测量算法进行了系统的分析和研究, 提出了一种利用四反射镜测量飞行器位置和姿态的算法。建立了一套原理性的扫描激光测量实验系统, 通过测量反射镜返回光信号的时间差、模拟计算出飞行器之间的距离和方位角, 实验结果与理论计算结果相符。

关键词: 扫描激光; 飞行器姿态; 反射镜; 光信号时间差
中图分类号: TM930.12+6 文献标识码: A

Study on the arithmetic and experiment of a laser scanning position and measurement

Zhu Dayong, Wang Ying, Wang Wei
(Department of Optoelectronic Technology, UESTC, Chengdu, 610054)

Abstract: On the basis of the systematic analysis and study on the arithmetic using scanning laser to measure the position of a aircraft in the process of anatomists, the arithmetic using four reflectors to measure the pose of the aircraft is put forward. An experimental system has been set up, the time interval of the optical signals is measured and the distance and azimuth of the aircraft is calculated. The experimental results are accordant with the theoretically calculated ones.

Key words: scanning laser; position of aircraft; reflector; time interval of optical signals

版权所有 © 《激光技术》编辑部

引 言

在实现航天飞行器交会对接过程中, 需要确定跟踪飞行器与目标飞行器之间的相对距离和位置姿态。从 70 年代开始, 美国国家航空和宇航局就开始着手研究 CCD 传感器测量目标距离和位置姿态[1], 80 年代日本和欧洲空间研究局也把 CCD 传感器测量作为交会对接的主要手段[2,3]。通常 CCD 传感器与激光雷达组合使用, 用激光照射角反射镜, 再由 CCD 传感器上成像的光点或图像, 经数据处理计算得到距离和位置姿态。也可以用激光信标代替角反射镜, 采用 CCD 双摄影测量算法, 对于空间每个目标点, 在像平面中建立其位置方程, 经计算和数据处理得到距离和姿态信息[4]。用 CCD 传感器测量算法, 结构较为简单, 精度也较高, 但数据处理复杂。

我们提出了一种四反射镜测量飞行器距离和姿态的算法, 利用扫描激光照射反射镜, 测量反射镜返回光信号的时间差、从而计算得到距离和姿态信息。本测量方法结构简单和运算量小, 并易于实现。根据四反射镜测量算法还建立了一个扫描激光实验系统, 并进行了距离和方位角测量实验, 实验结果和理论计算结果有较好的一致性。

1 扫描激光四反射镜测量算法

在追踪飞行器上安装有激光器, 一束激光在上升方向展宽(用柱面透镜实现)、并在水平方向扫描, 而另一束激光则在水平方向展宽、在上升方向扫描。在目标飞行器上安装有大小不同并按正方形排列的角反射镜, 如图 1 所示, 较大尺寸反射镜反射回来的强度比较小尺寸的大。在水平方向上对 4 个大小不同的角反射镜扫描(此时, 按正方形排列的角反射镜向逆时针方向旋转一个角度), 得到了 4 个返回信号的时间差和幅度, 如图 2 所示。而从上升方向扫描, 同样可得到 4 个返回信号的时间差和幅度, 如图 3 所示。图 2 和图

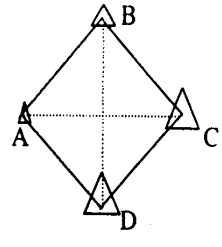

Fig. 1 Arrangement of the reflectors

作者简介: 朱大勇, 男, 1939 年出生。教授, 博导。从事激光传感及信息处理研究。

收稿日期: 2001-03-28; 收到修改稿日期: 2001-06-05

3 中, A 分别表示返回信号的幅度, t 分别表示水平或上升扫描时间, 4 个角反射镜反射信号的时间分别提供了 3 个位置信息参数, 即相对距离和方位角, 由此可确定目标飞行器的姿态。

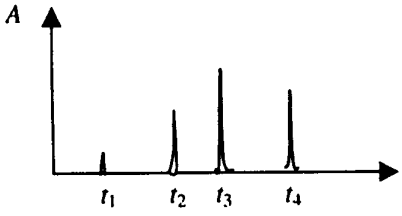

Fig. 2　The reflected signals through horizontal scanning

Fig. 3　The reflected signals through vertical scanning

如果角反射镜 A, B, C, D 在空间的位置如图 4 所示, 角反射镜 A, B, C, D 的上升扫描时间和水平扫描时间可分别表示为 $A(t_1, t_2')$, $B(t_2, t_4')$, $C(t_4, t_3')$, $D(t_3, t_1')$。于是, 角反射镜在空间的位置就可用水平扫描时间和上升扫描时间来表示。

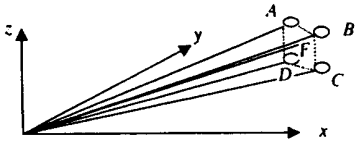

Fig. 4　The spatial position of A, B, C, D

设水平扫描和上升扫描的角速度分别为 ω_1, ω_2, 于是 A, B, C, D 4 点用空间方位角可分别表示为 $A(\omega_1 t_1, \omega_2 t_2')$, $B(\omega_1 t_2, \omega_2 t_4')$, $C(\omega_1 t_4, \omega_2 t_3')$, $D(\omega_1 t_3, \omega_2 t_1')$。在空间坐标系中, 上升扫描是以 y 轴为转轴, 从 x-y 面向上扫描, 而水平扫描则以 z 轴为转轴, 从 x-z 面向 y 轴负方向扫描。用水平扫描得到的第 1 个返回信号来确定飞机的水平方位角, 而用上升扫描得到的第一返回信号来计算上升方位角。

在空间坐标系中, 直线 OA 的空间方程为:

$$x = y/\tan(\omega_1 t_1) = z/\tan(\omega_2 t_2') \tag{1}$$

同理, 直线 OB, OC, OD 的空间直线方程为:

$$x = y/\tan(\omega_1 t_2) = z/\tan(\omega_2 t_4') \tag{2}$$

$$x = y/\tan(\omega_1 t_4) = z/\tan(\omega_2 t_3') \tag{3}$$

$$x = y/\tan(\omega_1 t_3) = z/\tan(\omega_2 t_1') \tag{4}$$

所以, 向量 $\overrightarrow{OA}$, $\overrightarrow{OB}$, $\overrightarrow{OC}$, $\overrightarrow{OD}$ 的方向向量分别为:

$$m_1 = \tan(\omega_1 t_1),\ m_2 = \tan(\omega_1 t_2),$$
$$m_3 = \tan(\omega_1 t_4),\ m_4 = \tan(\omega_1 t_3)$$
$$n_1 = \tan(\omega_2 t_2'),\ n_2 = \tan(\omega_2 t_4'),$$
$$n_3 = \tan(\omega_2 t_3'),\ n_4 = \tan(\omega_2 t_1')$$
$$\overrightarrow{OA} = \vec{i} + \vec{j} m_1 + \vec{k} n_1,\ \overrightarrow{OB} = \vec{i} + \vec{j} m_2 + \vec{k} n_2$$
$$\overrightarrow{OC} = \vec{i} + \vec{j} m_3 + \vec{k} n_3,\ \overrightarrow{OD} = \vec{i} + \vec{j} m_4 + \vec{k} n_4 \tag{5}$$

根据右手定则, $\overrightarrow{OA}$, $\overrightarrow{OC}$ 所成的空间平面的法向量即为向量 $\overrightarrow{OA}$, $\overrightarrow{OC}$ 的叉积为:

$$\overrightarrow{F_1} = \overrightarrow{OA} \times \overrightarrow{OC} = \begin{Bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 1 & m_1 & n_1 \\ 1 & m_3 & n_3 \end{Bmatrix}$$

$$\overrightarrow{F_1} = \{m_1 n_3 - m_3 n_1, n_1 - n_3, m_3 - m_1\} = \vec{i}(m_1 n_3 - m_3 n_1) + \vec{j}(n_1 - n_3) + \vec{k}(m_3 - m_1) \tag{6}$$

同理, 向量 $\overrightarrow{OB}$, $\overrightarrow{OD}$ 所成的空间平面的法向量即为向量 $\overrightarrow{OB}$, $\overrightarrow{OD}$ 的叉积为:

$$\overrightarrow{F_2} = \overrightarrow{OB} \times \overrightarrow{OD} = \begin{Bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ 1 & m_2 & n_2 \\ 1 & m_4 & n_4 \end{Bmatrix}$$

$$\overrightarrow{F_2} = \{m_2 n_4 - m_4 n_2, n_2 - n_4, m_4 - m_2\} = \vec{i}(m_2 n_4 - m_4 n_2) + \vec{j}(n_2 - n_4) + \vec{k}(m_4 - m_2) \tag{7}$$

$$\overrightarrow{OF} = \overrightarrow{F_1} \times \overrightarrow{F_2} = \begin{Bmatrix} \vec{i} & \vec{j} & \vec{k} \\ (m_1 n_3 - m_3 n_1) & m_1 - m_3 & n_3 - n_1 \\ (m_2 n_4 - m_4 n_2) & m_2 - m_4 & n_4 - n_2 \end{Bmatrix} \tag{8}$$

现已导出了方向向量 $\overrightarrow{OA}$, $\overrightarrow{OF}$, 于是两个向量之间的夹角就可以推导出来。设夹角为 $\angle AOF$, 则根据两向量的数量积是两个向量的模与夹角的余弦的乘积有:

$$\overrightarrow{OF} \cdot \overrightarrow{OA} = |\overrightarrow{OF}|\,|\overrightarrow{OA}|\cos(\angle AOF)$$

$$\angle AOF = \arccos\left(\frac{\overrightarrow{OF} \cdot \overrightarrow{OA}}{|\overrightarrow{OA}|\,|\overrightarrow{OF}|}\right) \tag{9}$$

同理我们可以求出角 $\angle BOF$, $\angle COF$, $\angle DOF$。

现取图 4 中的一个平面 AOC, 如图 5 所示, 其中 F 是图 4 中 AC 和 BD 的交点。已知 l_1, l_2, α, β, 则由三角形的边角关系, 可以推导得出:

$$\theta = \begin{cases} \arctan\left(\dfrac{\sin\alpha\sin\beta(1 + l_1/l_2)}{\sin\alpha\cos\beta - (l_1/l_2)\cos\alpha\cos\beta}\right) & (\text{若 } l_1/l_2 \neq \tan\alpha/\tan\beta) \\ \pi/2 & (\text{若 } l_1/l_2 = \tan\alpha/\tan\beta) \end{cases} \tag{10}$$

版权所有©《激光技术》编辑部

由(10)式可以求得 ΔAOC 中的 $\angle AFO$, $\angle CFO$。同理, 可以求出 $\angle BFO$, $\angle DFO$。而 AF, BF, CF, DF 已知, 根据正弦定理即可准确的求出 OA, OB, OC, OD。于是, 以 A 镜为例, 可以得到: 距离 $R_A = \{[AF/\sin(\angle AOF)]\sin(\angle AFO)\}$; 水平方位角为 $\omega_1 t_1$, 上升方位角为 $\omega_2 t_2'$。

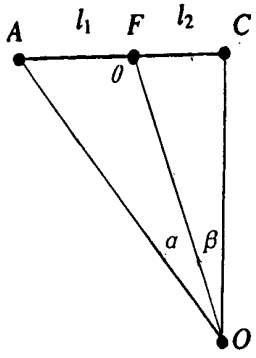

Fig.5 Calculating distance through visual angles

利用扫描激光四反射镜测量算法、现已推导出了计算飞行器之间距离、水平方位角和上升方位角的表示式。

2 扫描激光实验

2.1 扫描激光实验系统简介

扫描激光实验系统方框如图 6 所示。实验采用 He-Ne 激光器和 TeO_2 声光器件。TeO_2 晶体属于 422 晶体类, 无对称中心, 工作波长 $\lambda = 0.35 \sim 5\mu m$,

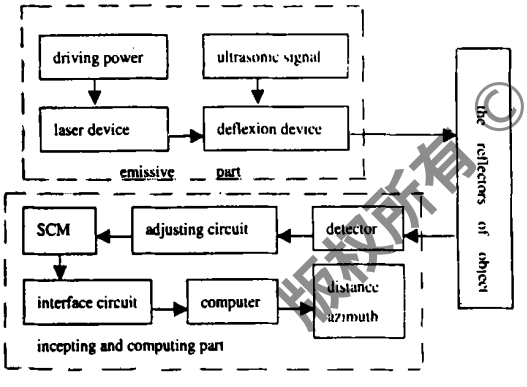

Fig.6 The experimental picture of measuring the angle and distance by laser scanning

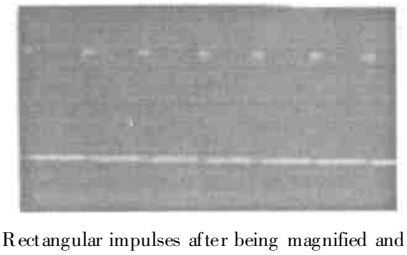

Fig.7 Rectangular impulses after being magnified and adjusted

峰值衍射效率 $\eta \geqslant 50\%$。He-Ne 激光经过声光偏转器后形成扫描激光束, 选用的 1 级扫描激光经角反射镜反射、并经会聚透镜后被探测器接收, 探测器输出的电信号经过放大、两级门电路整形, 得到如图 7 所示的矩形脉冲信号。由单片机测量两角反射镜返回信号的时间差, 所得数据经过电压转换电路(TTL 电平与 RS232 电平) 送入计算机, 由计算机进行进一步分析计算得到距离和方位角参数。

2.2 模拟测试数据

为了模拟扫描激光对飞行器的距离和方位角的测试, 固定两个角反射镜之间的距离为 $L = 20cm$, 见图 8。使两个角反射镜之间的连线与声光偏转器的方向垂直($\theta = 90°$), 并用两个反射镜模拟 4 个角反射镜, 其中用水平扫描旋转 90° 来模拟上升扫描, 而且水平扫描与上升扫描的起点都认定为第 1 个反射镜。设 ω_1 表示水平和上升扫描角速度, 设定 $\omega_1 = 5.81 rad/s$。设 t_n, t_n' 中 $n = 1, 2, 3, 4$ 为模拟的第 1 到第 4 个角反射镜的水平扫描与上升扫描时间, 由于水平和上升扫描都为第一个反射镜, 则有 $t_1 = t_1' = 0$, $t_2 = t_3 = t_2' = t_3' = \Delta t/2$, $t_4 = t_4' = \Delta t$(见算法部分)。改变两角反射镜之间连线中心点与探测器之间的距离 L_1, 测量两个角反射镜返回信号的时间差 Δt, 计算得到测量距离 L_2, 并与已知值 L_1 比较, 其相对误差为 $\sigma = |L_2 - L_1|/L_1$, 如表 1 所示。

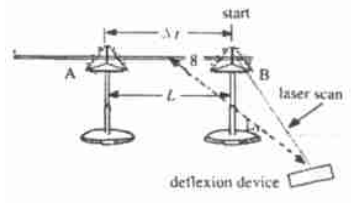

Fig.8 Scan the reflectors by laser

Table 1 The data of distance obtained by experimental measurement and theoretical calculation

L_1/m	3.0	3.12	3.30	3.35	3.46	3.6	3.74	3.89
Δt/ms	11.6	11.0	10.5	10.0	9.8	9.5	9.0	8.7
L_2/m	2.9	3.13	3.28	3.44	3.51	3.62	3.82	3.95
σ/%	1.3	0.3	0.6	2.6	1.4	0.5	2.1	1.5

为了模拟扫描激光对飞行器水平方位角的测量, 我们固定一个角反射镜, 并设定 $L_1 = 5.76m$, 将另外一个角反射镜水平移动, 取两角反射镜之间距离为 L, 测量两角反射镜返回信号时间差 Δt, 则可计算出测量的水平方位角 $\gamma_1 = \omega_1 \Delta t$, 实验计算值与理论计算值之间的相对误差为 $\delta = |\gamma_2 - \gamma_1|/\gamma_2$, 其中, γ_2 是根据图 5 中 $\theta = 90°$ 时, 计算的理论水平方位角。表 2 示出了实验测量和理论计算的水平方位角数据。

为了模拟扫描激光对飞行器上升方位角的测量, 仍将按测量水平方位角方式测量, 取另一组 L 值, 测量 Δt, 计算方位角, 不过此时应看成是水平扫描旋转90° 后模拟上升扫描的结果。表3示出了实

(下转第 220 页)

《激光技术》编辑部 版权所有 ©

证了调谐过程中泵浦激光不受晶体有限的接受角的限制,增益高,相互作用距离可超过 50mm,因而保证了高转换效率。(3)无双折射走离效应影响,调谐过程中不会出现光束偏离现象,无须调整腔内光学元件,因而操作简便。(4)将不同光栅周期的 PPLN 样品平移进光学谐振腔,辅以温度调谐,可实现1.35 ~ 4.83μm 输出。(5)适合高重复频率、高功率二极管激光泵浦的固体激光器(DPSL)和连续波二激光激光器泵浦,整个器件可做到小型化、全固化、一体化。PPLN OPO 将是未来中红外波段高功率、高重复频率、可调谐相干辐射的可靠光源。

2 结 论

中红外 OPO 作为一种关键的频率下转换器件,不但具有固体激光器的性能,而且能够在 3~ 5μm 波段范围内连续调谐。基于双折射相位匹配的 $ZnGeP_2$ OPO 与基于周期性极化铌酸锂的准相位匹配 OPO,在实现高重复频率、高功率甚至连续波输出方面得到成功验证。

参 考 文 献

[1] Chen D W, Fincher C L, Rose T S *et al*. Opt Lett, 1999, 24(6): 385~ 388.

[2] Toomad H A, Chandra S, David M R *et al*. Opt Lett, 1997, 22(9): 597~ 599.

[3] Hutchinson. A P L, 1997, 71(5): 584~ 586.

[4] Kenneth J M. Opt Lett, 1998, 23(9): 667~ 669.

[5] Kato K, Komine H. IEEE J Q E Selec Top, 1995, 1: 44~ 46.

[6] Mark S W, Peter F M, Jeffrey J K *et al*. Opt Lett, 1998, 23(15): 1161~ 1163.

[7] Bosenberg W R, Dean R. J O S A, 1993, B10(9): 1716~ 1722.

[8] Phua P B, Lal K S, Wu R F. Opt Lett, 1998, 23(6): 1262~ 1264.

[9] Toomad H A, Chandra S, David M R *et al*. Opt Lett, 1997, 22(9): 597~ 599.

[10] Norman P B, Keith E M, Mahendra G J *et al*. J O S A, 1998, B15(1): 232~ 237.

[11] Peterson R D, Schepler K L, Brown J L. J O S A, 1996, B12(11): 2142~ 2146.

[12] Armstrong J A, Bloembergen N, Ducuing J *et al*. Phys Rev, 1962, 127: 1918~ 1939.

[13] Yamada M, Nada N, Saitoh M *et al*. A P L, 1993, 62: 435~ 436.

[14] Myers L E, Echardt R C, Fejer M M *et al*. J O S A, 1995, B12(11): 2102~ 2116.

[15] Walter R B, Alexander Drobshoff, Jason I A *et al*. Opt Lett, 1996, 21(17): 1336~ 1338.

[16] Myers L E, Echardt R C, Fejer M M *et al*. Opt Lett, 1996: 21(8): 591~ 593.

(上接第 216 页)

验测量值和理论计算值的上升方位角数据。

Table 2 The data of horizontal azimuth obtained by experimental measurement and theoretical calculation

L/cm	12	14	15.6	17.5	18.6	20	22
Δt/ms	3.5	4.3	4.5	5.1	5.4	5.9	6.6
φ_1/°	1.17	1.42	1.50	1.72	1.81	1.96	2.22
φ_2/°	1.19	1.39	1.55	1.74	1.85	1.99	2.19
δ/%	1.7	2.2	3.2	1.1	2.2	1.5	1.4

Table 3 The data of vertical azimuth obtained by experimental measurement and theoretical calculation

L/cm	6	10	12	15	19	21	25
Δt/ms	1.7	2.7	3.4	4.5	5.5	6.1	7.5
φ_1/°	0.58	0.93	1.16	1.50	1.85	2.02	2.50
φ_2/°	0.60	0.99	1.19	1.49	1.89	2.09	2.49
δ/%	3.3	1.0	2.5	0.6	2.1	2.3	0.4

通过激光对两角反射镜扫描实验,模拟测试了两飞行器之间的距离、水平方位角和上升方位角。同时可以看出测量值与算法计算值十分接近,这说明建立的扫描激光 4 反射镜测量算法理论模型是正确的。

3 结 语

首次提出一种扫描激光 4 反射镜测量算法,利用 4 反射镜反射信号的时间分辨而提供了两飞行器间的相对距离、水平方位角和上升方位角 3 个位置信息参数,从而确定了目标飞行器的距离和姿态。根据扫描激光 4 反射镜测量算法原理,还进行了实验研究,利用扫描激光照射假定目标飞行器角反射镜,模拟测试了两飞行器之间的距离、上升方位和水平方位角数据,实验测量值和理论计算结果有较好的一致性。利用扫描激光 4 反射镜测量算法,系统结构简单,运算量小,易于实现,并适用于 200m~ 20km 范围内飞行器之间的距离和位置姿态测量。

参 考 文 献

[1] Blabchard E P. N72-12589, 1972.

[2] Nakatani I. IFA-86-04, 1986.

[3] Howard R T. N92-26043, 1992.

[4] Salt D. SPIE, 1995, 2463: 102~ 114.

[5] Gravely B. N94-23828, 1994.

《激光技术》编辑部 版权所有 ©