CCD 水平設置型非接触距離センサの結像性*

横内弘宇** 藤岡 誠*** 菊地千之** 岸浪建史†

Aspects of Image Formation on CCD Surface Set Horizontally
in the Optical System of Non-contact Distance Measuring Sensor

Hiroataka YOKOUTI, Makoto FUJIOKA, Kazuyuki KIKUCHI and Takeshi KISHINAMI

The distance measuring sensor proposed has a lens system based on an astronomical telescope type with the fixed distance between lens L_1 and L_2 to the sum of focal lengths, $f_1 + f_2$. Through the optical system, an object point $P_s(r_s, \theta_s, Z_{s1})$ in the object space which is measured from the front focal point F_{11} of L_1 is converted linearly into a real inverted image point $P_r(r_r, \theta_r, Z_{r2})$ measured from the rear focal point F_{22} of L_2 in the image space; that is $\{(f_2/f_1)r_s, \theta_s + \pi, -(f_2/f_1)^2 Z_{s1}\}$. In order to know Z_{s1} of the laser beam spot on an object Z_{r2} is to be detected, then the sensor has 1-D CCD placed horizontally so that it makes the pixel line in alignment with the optical axis, as is the case of the laser beam axis. The problem is what aspects of image formation occurs on such an unusual horizontal plane, when a laser beam spot on the object has a finite size of diameter under other conditions such as distance Z_{s1} , object surface orientation, misalignment of CCD and so on. The paper discusses this problem, examining through spot diagrams and illumination intensity distributions of the image formed by optical computing, by means of ray-tracing method and by applying a multi-point-source model to the beam spot. As conclusions, the peak location of computed illumination intensity for the image corresponds to the theoretical whatever height and form of the peak is affected by Z_{s1} and object surface orientation, provided that each alignment in the optical system is ideally perfect.

Key words : 3-dimensional shape measuring system, CCD, range finder, image formation, spot diagram, optical computing

1. 結 論

3次元形状測定のために開発された非接触距離センサ¹⁾に採用されている光学系は、天体望遠鏡型の凸レンズ系²⁾でありレンズ間距離は正確に両レンズの焦点距離の和 $f_1 + f_2$ に固定されている (図1)。この光学系の特徴は、限られた範囲に関してではあるが、対象物空間の点群を実像空間の点群に線形写像することである。従って非常に小さなスポットの実像位置の検出は直ちに三次元座標測定になり得る。

距離センサは、光軸上に合わせたレーザビームによって物体表面に光スポットを得て、その実像の軸方向位置を、やはり光軸上に水平に設置された1D-CCDによって検出する。既に実験において、レンズ

L_1 の前焦点 F_{11} からスポット中心までの距離 Z_{11c} と CCD 出力の最大値を与える画素番地 P_x との間に極めて良い線形関係があることが確認されている¹⁾。

一般に光学系の結像面は光軸に直交するのが通常であり、光軸に平行な面については、ボケの現れ方などほとんど知られていない。本報告は幾何光学を基にして、ある大きさの直径を有するレーザビームスポットに対して点光源群モデルを提案し、水平面への結像のスポットダイアグラム、照度分布等を得て、CCD 受光面における結像性を調べるものである。 Z_{11c} 及び物体表面方位を変化させ、また与えられた CCD 設置誤差の影響についても検討した。実験的には、光学系や CCD の設定を定量的に正確に定めることは困難であ

Fig. 1 Principle of the distance measuring device

* 原稿受付 昭和63年10月14日。昭和63年度精密工学会北海道支部学術講演会 (昭和63年8月31日) にて発表

** 正会員 室蘭工業大学 (室蘭市水元町27-1)

*** 学生会員 室蘭工業大学

† 正会員 北海道大学工学部 (札幌市北区北13条西8丁目)

Fig. 2 An element in the multi-point source model of a laser beam spot

り得られた結果の分析や解釈にも限りがある。これらの制約を受けないという意味で、この計算機実験は有効である。

2. 光経路の解析

正弦条件が成り立つ薄肉レンズ系とし、ビームスポット内の表面凹凸や粗さ、レンズの収差、光の干渉は考慮しない。また、第一レンズ L_1 は反射型望遠カメラレンズ（カタジオプトリック型）を用いるので無効内半径を持つ。また下半分を通る光は CCD 裏面に向かうので無効である（図 1, 図 3）。

2.1 点光源群モデル

ある有限寸法の光照射面からの拡散反射光によってある観測面に生ずるスペックルの状況は、光波長、表面粗さ、スポットの形状寸法、面間距離等に依存する。レンズが用いられる場合は F 値や分解能なども関与する。表面粗さが小さくなれば次第にスペックルのコントラストは落ちて行き拡散反射から正反射成分が増して行く状況になるであろうし、反射率 ρ の角度依存性や反射による偏光変化なども生じ、決して単純ではない。一般に表面粗さをもつ照射面からの光散乱に関しては、二三の散乱理論が展開されている³⁾。表面粗さを考慮する場合には有効な光スポットモデルになるであろう。しかしながら、ここでは単純のために、光照射を受ける面は Lambert 則に従う $\rho < 1$ の完全拡散面とする（実際には MgO , $BaSO_4$ 等を含む艶消し塗装を用いる）。

次にレーザビームスポットの照度はビーム中心からの半径座標に対してガウス分布⁴⁾するものとする。このような条件を満たすようにビームスポット面を要素点光源群に置き替える。スポット内で半径 r にある要素点光源 P_s の法線方向の光度 I_p (W/str) は

$$I_p = (1/\pi) \cdot I_0 \exp(-(r/a)^2) \cdot dA \quad (1)$$

ここで、 I_0 : ビーム中心の光束発散度、 a : ビームの光強度が I_0 の $1/e$ になる半径、 dA : 点光源のスポット面における占有面積である（図 2）。

2.2 光路解析

Fig. 3 A light ray traced from a source P_s to the image Q on a horizontal plane and coordinate axes

Fig. 4 Object surface normal J defined by θ_j and ϕ_j

光軸を Z 軸、 L_1 の位置を基準として、光源からレンズ系に向かう向きを正とするような座標系（グローバル座標系）を考える（図 3）。光経路上の点を P 、その位置ベクトルを $\mathbf{P}$ 、光線を有向線分 $\mathbf{R}$ とし次のような添え字を与える。すなわち、それぞれ、 s : 光源、 1 : レンズ L_1 、 2 : レンズ L_2 、 r : 実像、 i : レンズ L_1 による P_s の像に対してである。このとき一般に、

$$\mathbf{R}_{j,k} = \mathbf{P}_k - \mathbf{P}_j \quad (2)$$

試料表面を傾けるために用いた保持具のジンバル構造の都合から、二つの角度 ϕ_j , θ_j を定義する（図 4）。すなわち

ϕ_j : 表面の法線ベクトル $\mathbf{J}$ の Z 軸からの回転角

θ_j : $\mathbf{J}$ が ϕ_j の回転を生ずる面 (plane θ_j) を指定する角度、 x 軸からこの面までの角。

試料の状態を $Z_{11c}(\theta_j, \phi_j)$ などと表す。このとき、

$$\mathbf{J} = \begin{Bmatrix} \cos \theta_j \cdot \sin \phi_j \\ \sin \theta_j \cdot \sin \phi_j \\ \cos \phi_j \end{Bmatrix} \quad (3)$$

$\mathbf{J}$ が与えられたときスポットモデルの各点光源の z 位置が変化すると同時に Lambert の $\cos$ 則に関する角度 θ_{Lam} も変わる。

$$\mathbf{P}_s = \begin{Bmatrix} r_s \\ \theta_s \\ Z_{11s} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} r_s \\ \theta_s \\ Z_{11c} + Z_j \end{Bmatrix} \quad (4)$$

ただし、 $Z_j = r_s \cos(\theta_s - \theta_j) \cdot \tan \phi_j$ 。

Fig. 5 Source points in the model distributed (a) radially with equal intensity, (b) rectangularly

点光源 P_s から第1レンズ L_1 上のある区画の代表点 P_1 までの光線 $\mathbf{R}_{s,1}$ と測定物表面の法線ベクトル $\mathbf{J}$ とがなす角すなわち θ_{Lam} のとき (図2), 注目している点光源 P_s から見て P_1 方向の光度 $I_{j,1}$ (W/str) は

$$I_{j,1} = I_P \cos(\theta_{Lam})$$

$$= \frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{R}_{s,1}}{|\mathbf{J}| \cdot |\mathbf{R}_{s,1}|} \cdot I_P \quad (5)$$

P_s からの光線はレンズ L_1 上の点 P_1 を通過してレンズ L_1 による P_s の像 P_i に向かう。従って, $\mathbf{R}_{1,i}$ と L_2 レンズ面の交点 P_2 は $\mathbf{R}_{1,i}$ に対する内外挿比を得て求められる。実像の位置 P_r は式 (6) より決定できる。すなわち, Newton の結像式により,

$$\mathbf{P}_{r22} = \begin{Bmatrix} r_r \\ \theta_r \\ Z_{r22} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} (f_2/f_1) \cdot r_s \\ \pi + \theta_s \\ -(f_2/f_1)^2 \cdot Z_{s11} \end{Bmatrix} \quad (6)$$

これを $\mathbf{P}_r$ (汎座標系) に変換して, $\mathbf{R}_{2,r}$ は式 (2) を用いて求められ, これと参照平面 (y 平面または CCD 設置平面) との交点 Q はやはり $\mathbf{R}_{2,r}$ に対して P_2 から Q までの内外挿比を求めて決定することができる。

光源を要素分割し, 分割区画の代表点に点光源を置き, レンズ L_1 もまた要素分割して代表点を定め多数の $\mathbf{R}_{s,1}$ について, 光路計算を実行する。このとき式 (1) によって与えられる I_P がみな同じであるように分布させた点光源群を, 等強度点光源群とし, これを図5(a)に示す。このような点光源群から得られる Q 点の集まりは, スポットダイアグラム⁵⁾であり, 点密

度がある程度照度に比例するような点像となる。

2.3 計算結果の表示法

2.3.1 スポットダイアグラム

図6(a)は上述の方法によって得られたスポットダイアグラムの一例である。 Z_{11c} に対応する理論結像位置 Z_{22c} を中心にして前後 (Z 方向) 左右 (X 方向) に $2200 \mu\text{m} \times 1400 \mu\text{m}$ の範囲を設けて Q 点を採集した。レーザスポット円の実像と参照平面との交線近傍は谷間のように抜けている。ここは急に結像性が良くなり, スポット表面の細かい状況がボケずに出てくるために, 点光源群モデルの離散性が顕著になったものである。しかし実際は (c) のように連続しているとみてよい。ちなみに中心部 (半径 0.297 mm 以下) の点光源を故意に除去したもののダイアグラムをみると, 接合円すい体状に抜ける (図6(b))。このことは小光沢面, スケールなどの原因でビームスポット中心部に小さな暗点がある場合 CCD に複峰的な出力を生ずる可能性を示唆する。

2.3.2 照度分布

照度分布を得るためには, 図5(a)の等強度点光源群モデルに固執する必要はなく, 上述の事情を考慮して中心線近傍の点光源密度を増し直交座標分割したモデル (図5(b)) の方が, 計算精度のために都合がよい。図6(c)および図7の照度分布はこのモデルによって得られた一例である。ここで図6(a)に pixel 数で示した領域は (c) が得られている範囲を示す。

光線 $\mathbf{R}_{s,1}$ は式 (5) で与えられる光度を持つ。従って, 第1レンズ L_1 上のある区画面積 ΔA_1 がある点光源 P_s に対して張る立体角により, P_s からレンズ L_1 のこの区画を通る光束の第一近似値は,

$$F_{s,1} = I_{j,1} \cdot \frac{\Delta A_1}{\text{DIS}^2(P_s, P_1)} \quad (7)$$

ここで, $\Delta A_1 = R_1 d\theta_1 \cdot dR_1$; L_1 上の区画面積, $\text{DIS}(P_s, P_1)$; P_s 点から P_1 点までの距離, P_1 ; 区画 ΔA_1 内の代表点である。

ここでいう照度分布とは, CCD の画素 ($11 \times 11 \mu\text{m}$) を模擬して水平面に同寸法の区画を配置して, Q 点が

Fig. 6 (a) An example of spot diagram, (b) that of missing elements inside of radius 0.297 mm and (c) a computed illumination intensity for the image in (a)

Fig. 7 Illumination intensity and spot diagrams when distance Z_{11} is varied, indicating the sense of $+Z_{22}$ with the arrows

入る区画にこの光束を次々と積算して得られるものである。区画設置は、中心区画（点 Z_{22c} を中心に含む）を基準にして、 X 方向には ± 20 pixel, Z 方向には ± 100 pixel, すなわち 41×201 区画の範囲がデータ採集領域である。図 6 (c), 図 7 の 3 次元表示の図は見やすさのために同領域を 21×51 区画に再構成し、 x 方向に対して Z 方向の寸法は $1/2$ に縮尺してある。

L_1 の分割密度は、レンズ L_1 のある区画を通過した光束が水平参照面と交わったとき、 Q 点の周りに生ずる擬扇形状のボケ像の寸法が画素区画程度になるように定めた。またさらに y 平面に対して入射角余角が 5° 以下になる $R_{2,r}$ のデータは棄却した。

上述の領域では光束の水平断面面積は十分小さくまた棄却による影響は無視できる程であった。

3. 計算結果

解析に用いた定数を示す。すなわち、

レーザービーム強度	: 3 mW
$1/e$ 強度ビーム半径	a : 1.07 mm
第一レンズ外半径	: 40 mm
内半径	: 20 mm
焦点距離	f_1 : 240.7 mm
分割半径	ΔR : 2.5 mm
分割角度	$\Delta \theta$: 4.0°
第二レンズ口径	: 35 mm
焦点距離	f_2 : 35.7 mm
ビームスポット半径	r_0 : 1.07 mm
反射率	ρ : 0.5
点光源総数（等強度分割）	: 112 points
（直角座標分割）	: 800 points
対象物表面方位設定角	θ_1 : $0^\circ, 90^\circ$
	ϕ_1 : $0^\circ, \pm 75^\circ$
軸方向倍率	$(f_1/f_2)^2$: 45.46
半径方向倍率	(f_1/f_2) : 6.74

3.1 CCD 設置誤差が無い場合

Fig. 8 Illumination intensity (considered as CCD output) on the center line when (a) Z_{11} changed, and (b) surface inclination

映像参照面が水平で、かつ y 方向オフセット $\varepsilon_y = 0$, すなわち $y=0$ 面である場合について扱う。この場合、CCD のみならずレーザービーム軸、レンズ L_1, L_2 軸などもすべてが理想的に設定されている場合に相当する。

図 7, 図 8 (a) によれば、測定距離 Z_{11} が短いほど照度のピーク値は大きく鋭い。一方、ボケ像（スポットダイアグラム）は比較対称性の良い X 形であるが Z_{11} が大きくなるにつれ光軸方向に長く伸びるようにボケる。そして照度のピークの値は小さくなる。しかしながらピークの位置は、スポットの中心 Z_{11c} の実像位置 Z_{22c} を中心に含む区画 (2×4 pixel) 内に入る。

ピークの主要部の x 方向幅は Z_{11} によらず $2r_0(f_2/f_1)$ 程度の値（約 $320 \mu\text{m}$ ）となり、ボケ像が X 形である場合でもピーク主要部は比較的単純であり、1D-CCD の pixel 軸の x 方向のオフセット ε_x が $r_0(f_2/f_1)$ 程大きくならなければ、この形による CCD 二峰型出力が生ずる可能性はまずないことが分かった。

図 8 (b) のように、 $Z_{11}=100$ mm に関してであるが、 $(\theta_1, \phi_1)=(0, 0)$ に対して $(0, 75^\circ)$, $(90^\circ, 75^\circ)$, $(90^\circ, -75^\circ)$ のように物体表面に傾斜がある場合において（対応するスポットダイアグラム及び照度分布は図

Fig. 9 Misalignments of CCD

11 の中段, $\varepsilon_y=0$ の場合参照), ピークの高さは (0, 0) の場合の 1/4 程度となりまた形状の対称性が変化するにもかかわらず, その位置は Z_{22c} 点を中心を含む区画内に入った。

3.2 CCD 設置誤差がある場合

次に光軸に対するレーザビーム軸や CCD の設置にミスアライメントがある場合ピーク位置がどのような影響を受けるかを調べる。

3.2.1 CCD 設置の位置姿勢に関する自由度

CCD 設置の位置や姿勢に関する自由度はもちろん 6 でありそれぞれに誤差が生じ得る (図 9)。これらの誤差の内, Z 軸 (CCD 画素配列軸) 方向の平行ずれと同軸周回回転ずれは測定の質に本質的な影響を持たない。Eθ, Eφ については, これらの値は実際にも非常に小さいので, 一つのスポット結像そのものへの影響は小さい。さらに全領域について言えば, CCD 上の位置 Z_{22} に対して直線的に変化する $\varepsilon_y(Z_{22})$, $\varepsilon_x(Z_{22})$ が与えられているのと同様である。このうち, ε_x については ± 20 pixel ($\pm 220 \mu\text{m}$) の範囲で 2 pixel ごとに照度分布データを得ているので, ε_y に関してのみスポットダイアグラム, 照度分布, ピーク位置のずれなどを詳細に検討すれば十分である。

もう一つのミスアライメントはレーザビーム軸と光軸のずれである。この場合も問題になるのは 4 自由度であり, それらは CCD と光軸のずれ, ε_y , ε_x , Eθ, Eφ に対応している。しかもそれぞれ独立に, 倍率によって実体系から映像系へ線形変換可能であり等価値を与えることが出来る。L₁, L₂ 軸間のミスアライメントは今では考慮しない。

3.2.2 計算結果と評価

どの程度の ε_y を与えればよいか (また実際どの程度の値か) については何も知られていないが, 試みとして $\pm 40 \mu\text{m}$ を与えた (図 10)。

$Z_{11c}=100$ mm, 第一レンズの平均半径 30 mm とすると, メリジонаル面内で, ここを通過して CCD に到達する光線と CCD 面のなす角は, $\theta_{\text{CCD}} \approx 30^\circ$ であるから約 6 pixel すなわち 2×4 pixel 区画で 1.5 区画程度 Z_{22c} からずれが生ずるとした値である。

主として $Z_{11c}=100$ mm の場合について, 物体表面

Fig. 10 Missetting of CCD surface elevation, ε_y

の方位角 θ_i , ϕ_i を変化させて前節と同様の数値計算を実行した。点光源群は $y_s = -(f_1/f_2)\varepsilon_y$ の位置を線対称軸にして密度を図 5 (b) のように変えて約 800 個設定した。

図 11 は参照面上の照度分布及びビームスポットの映像を表すスポットダイアグラムである。上から $\varepsilon_y = +40, 0, -40$ (μm), また左から $(\theta_i, \phi_i) = (0, 0), (0, 75), (90, 75), (90, -75)$ の順に配列されている。左方の数値はピークの照度 ($\mu\text{W}/\text{mm}^2$) である。矢印は Z_{22} 軸の向きを示す。中央区画の番号 ($z\#, x\#$) は (25, 10) であり, この区画の中心は理論検出位置 Z_{22c} となっている。区画の大きさは 2×4 pixel であるから, $z\#$ で ± 1 ずれることは正しい検出から $\pm (2 \sim 6)$ pixel, すなわち測定距離にして $\pm (1.0 \sim 3.0)$ mm ずれることを意味する。前節と同様にピークの位置の x 方向ずれに関しては, 中央区画からはみ出る例はない。図 10 から容易に予想されるように $\varepsilon_y = +40 \mu\text{m}$ のときピーク位置は Z_{22c} よりも 1~2 区画前方 (実体側) に, $\varepsilon_y = -40 \mu\text{m}$ のとき後方 (空間側) に移動する傾向がみられる。

$(\theta_i, \phi_i) = (0, 75)$ は物体の表面が y 軸まわりに $+75^\circ$ まわった方位でありこの場合は, ポケ像にも照度分布にも非対称性が生ずる。 $(\theta_i, \phi_i) = (90, 75)$ の場合は, ε_y にかかわらずピーク形状は概して裾が広がり, 計算精度は若干落ち込む。逆に $(90, -75)$ の場合にはほとんど伏したような状態の対象物表面上に長く楕円状に延びたレーザビームスポットを第一レンズの上半分から望む状況となるが, 観察方向への投映像の y 方向寸法は小さくなりピーク形状はむしろ幾分鋭くなる。しかしこれらのピークの高さには大差がない。

中央区画番号 $z\#=25$ からの偏差を区画番号単位のままで示すと表 1 のようである。照度分布の曲面の凹凸から判断して精度が必ずしも十分でない場合もあるが $\varepsilon_y = \pm 40 \mu\text{m}$ 程度でも, 距離 Z_{11c} に対する直線性はわずかに失われ, 表面方位変化に対しても若干影響されるようになってくる。

1D-CCD の pixel 軸が光軸と平行で離れ ε_x がある場合について, 定性評価ではあるが, $\varepsilon_y=0$ の場合は照度分布の x 軸に関する対称性が良くあまり問題に

Fig. 11 Illumination intensity and spot diagrams for $Z_{11c}=100$ mm when surface inclination changed, upper line; for $\varepsilon_y=+40$, middle line; for $\varepsilon_y=0$, lower line; for $\varepsilon_y=-40$ μm

Table 1 Peak location deviation from the central block in address number

Z_{11} mm	-100	0	100								200	350	500	800
θ_i	0	0	0	0	0	90	90	90	90	0	0	0	0	0
ϕ_i	0	0	0	45	75	45	75	-45	-75	0	0	75	0	0
ε_y	+80	-1	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-3	-5	-4	-2	-2	-2
	+40	-1	-2	-2	-2	-1	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2	-2
	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	-40	0	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+2	+2	+2	+2	+2
	-80	+1	+2	+2	+1	+2	+2	+2	+2	+4	+4	+4	+4	+4

ならない。しかしながら、 ε_y が大きくなるに従って非対称性が強調されてくるので、 ε_x , ε_y が共存する場合は $z\#=25$ からの偏差は大きくなる傾向となる。

4. 結 論

得られた計算結果は波動光学的な見地からの解析を含まないので、表面粗さ、レーザビーム開口縁での回折、あるいはスペックルなどの問題には何ら関与するものではないが、考案されている距離センサに対してレンズを無収差であるとし、また物体表面が完全拡散反射面であるとして、レーザビームスポットの水平面に対する結像性を数値計算により検討した結果、次のような結論を得た。すなわち、

- (1) 光源がある大きさをもつ場合水平中心線の極近傍は水平参照面の対応する線上に詳細な結像が生ずる。
- (2) 測定距離が短い程スポット映像の照度分布は鋭い分布となり良質な測定となる。
- (3) 照度分布の形や大きさは距離によってかなり変化するが、CCD面が正しく設置されている場合は、ピークの位置はスポット中心位置の式(6)

による理論値と ± 2 pixel ($Z_{11}; \pm 1$ mm) の範囲内で一致する。

- (4) 物体表面方位 θ_i, ϕ_i が $\pm 75^\circ$ 程度傾いたとき照度分布の形や大きさはかなり変化するにもかかわらず、CCD面が正しく設置されている場合は、ピークの位置の変化は ± 2 pixel (± 1 mm) 以内である。

(5) 水平参照面の高さに(従って光軸に対する傾斜についても)ミスアライメントがある場合、ピーク位置はZ軸方向にのみずれる。

- (6) CCDの設置軸が水平面内で平行ずれ ε_x を持つ場合 ε_x がビームスポット映像半径 $(f_2/f_1) \cdot r_0$ を越えない限り、CCD出力は二峰とはならない。などが確かめられた。

参 考 文 献

- 1) 横内弘字, 早川 保, 菊地千之, 金井 理, 岸浪建史: 大型鋳造品自動ケ引きシステムに関する研究(第1報)——素材形状認識のための非接触距離センサおよび5面測定機の開発, 精密工学会誌, **54**, 12 (1988) 2353.
- 2) 三好隆志ほか: 光触針形状測定センサの特性, 昭和60年度北海道支部講演会論文集(1985) 67.
- 3) 柳 和久: 反射光強度分布による精密加工表面粗さの非接触測定, 精機学会光を用いた工学表面の性状評価分科会編「非接触方式による精密加工表面の性状評価」, 理工企画(1985) 64.
- 4) レーザ協会(川澄博通)編: レーザ応用技術ハンドブック, 朝倉書店(1984) 69.
- 5) D. P. Feder: Optical Calculations with Automatic Computing Machinery, J. Opt. Soc. Amer., **41**, 9, (1951) 630.