

30mm幅エッジセンサの開発

Development of 30mm wide edge sensor

株式会社 山武

岡山 喜彦

アドバンスオートメーションカンパニー Yoshihiko Okayama

株式会社 山武

越 俊樹

アドバンスオートメーションカンパニー Toshiki Koshi

株式会社 山武

加納 史郎

アドバンスオートメーションカンパニー Shiro Kano

キーワード

FPD、X,Y, θ 位置決め、フレネル回折、エッジ位置、リニアイメージセンサ、レーザ

2004年8月号のセーブメーションレビューでコンデンサや電池のフィルム巻き取り機の蛇行制御に使う7mm幅のエッジセンサを紹介した。今回大型のFPD(液晶、PDP、EL)ガラス基板の非接触位置決め用に測定幅を広げた30mm幅のエッジセンサを開発した。本センサはレーザ投光器と多画素のリニアイメージセンサを使った受光器を500mmも離した状態で位置検出し、さらにガラス基板の3箇所に設置した受光器から20mも離れたところで、X、Y、 θ の計算をして出力しなければならない。今回これらの実現方法と新しい技術について説明する。

In the August 2004 edition of Savemation Review, we introduced a 7 mm wide edge sensor for drift prevention control in film winding machines for capacitors, batteries, etc. We have now developed a 30 mm wide, non-contact edge sensor for the precise positioning of glass panels during the manufacture of large flat panel displays (FPDs), such as LCDs, PDPs, and ELs. A laser transceiver and linear image sensor receiver pairs, positioned 500 mm apart perform the precise position detection. By using three such pairs, the sensor's controller located 20 m away can calculate the accurate X, Y and θ positions. This paper presents the method by which this was achieved and the newly developed technologies.

1. はじめに

レーザ平行光をガラスに当てるときエッジ部分でフレネル回折を起こして、受光面で光量のへこみが生じる。このフレネル回折からエッジ位置を見つける方式のエッジセンサについて文献1で紹介した。

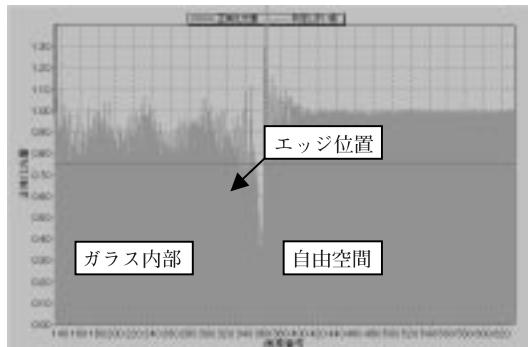


図1. ガラスエッジの光量分布

この方式を使うと粗いリニアイメージセンサで高精度にエッジ位置を見つけることができるが、各画素の光量が安定していないければならない。測定幅を広げるために多画素のリニアイメージセンサを使うとA/Dコンバータは外付けとなり、ノイズも多くなって光量が安定しないために精度が悪くなってしまう。さらにセンサヘッドからコントローラまでが20mもあると光量を高速に安定して取り込むのは困難である。このため受光器にCPUを内蔵させて空間デジタルフィルタでノイズ除去、複数画素を使った相関でエッジ位置を求め、さらにコントローラに最終エッジ位置を転送してX、Y、 θ の位置計算をする方式のエッジセンサを開発した。

2. デジタルフィルタを使ったノイズの低減

光量を安定させるためにはフィルタを使えばよいが時間的なフィルタは測定周期が延びるので採用できない。そこで空間的な光量分布をデジタルフィルタを使って安定させることにした。



図2. 全入光光量分布(デジタルフィルタなし)



図3. 全入光光量分布(デジタルフィルタあり)

デジタルフィルタを通して光量は安定するがフレネル回折のパターンではなくなるため、従来のフレネル回折の近似式をそのまま使うことはできない。

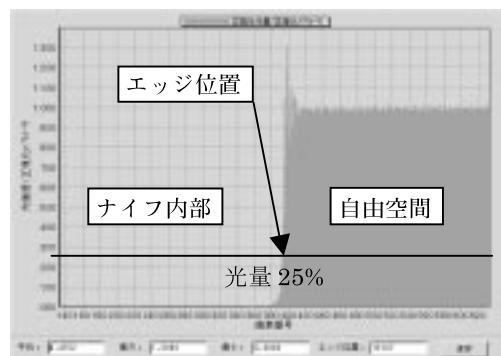


図4. ナイフエッジ光量分布(デジタルフィルタなし)

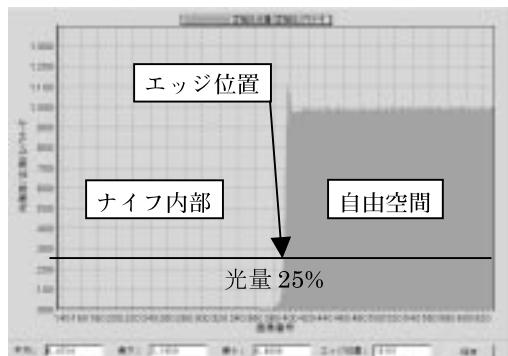
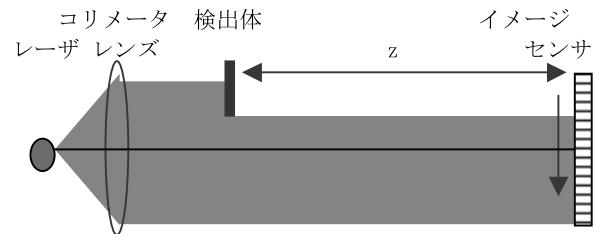


図5. ナイフエッジ光量分布(デジタルフィルタあり)

図6. フレネル回折の原理



フレネル回折の受光面 x での光強度分布 $A(x)$ の計算式は次のように表される。

$$A(x) = \frac{1}{2} \left[\left(\frac{1}{2} + \int_{-\infty}^{\frac{x}{\lambda z}} \sin \frac{\pi}{2} t^2 dt \right)^2 + \left(\frac{1}{2} + \int_{-\infty}^{\frac{x}{\lambda z}} \cos \frac{\pi}{2} t^2 dt \right)^2 \right] \quad (\text{式 } 1)$$

ただし λ は光の波長、 z は検出体から受光面までの距離である。この式は次の近似式で高精度に近似できることを文献1および文献9で示した。

$$x < \frac{\pi}{1.98\sqrt{\frac{2}{\lambda}}} \text{ のとき } A(x) = 1.37 \times \operatorname{sech} \left(1.98 \sqrt{\frac{2}{\lambda}} x - 2.39 \right) \quad (\text{式 } 2)$$

$$x \geq \frac{\pi}{1.98\sqrt{\frac{2}{\lambda}}} \text{ のとき } A(x) = 1 + \frac{1}{\frac{4\pi^2}{\lambda z} x^2} + \frac{\sin\left(\frac{\pi}{\lambda z} x^2\right) - \cos\left(\frac{\pi}{\lambda z} x^2\right)}{\pi \sqrt{\frac{2}{\lambda z}} x}$$

デジタルフィルタの伝達関数が決まれば、フレネル回折の近似式のフィルタ通過後の分布がわかり、この光量分布を使って補間計算を行うことができる。デジタルフィルタとしては下記2次のバターワース型ローパスフィルタを使った。

$$H(s) = \frac{\omega_c^2}{\omega_c^2 + \sqrt{2}\omega_c \cdot s + s^2}, \omega_c = 2\pi f_c \text{ カットオフ周波数} \quad (\text{式 } 3)$$

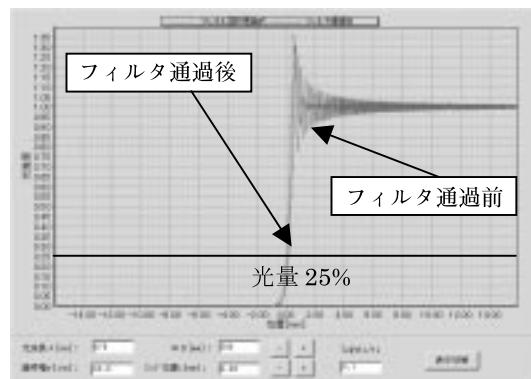


図7. フレネル回折の計算

図5のフィルタ通過後の測定光量を図7のフィルタ通過後の理論式にあてはめて補間すると粗い画素のイメージセンサでも精度を上げることができる。

3. 相関を使ったエッジ位置検出

従来の光量25%前後の2点で補間する方法だと画素毎にランダムに発生するノイズの影響を受けやすい。フレネル回折の近似式を使えば簡単に回折パターンの理論計算ができるので複数の画素を使って、測定光量と参照光量の相関でエッジ位

置を見つけると、安定して高精度にエッジ位置が検出できる。

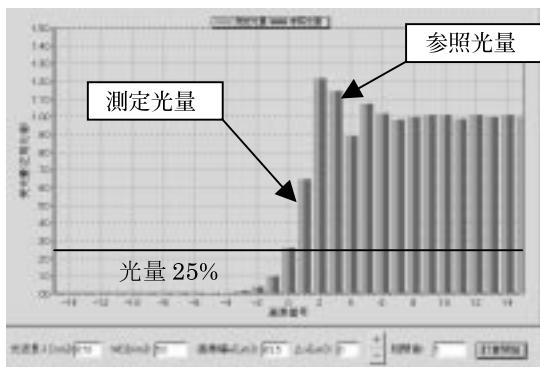


図8. 測定光量と参照光量が一致したとき

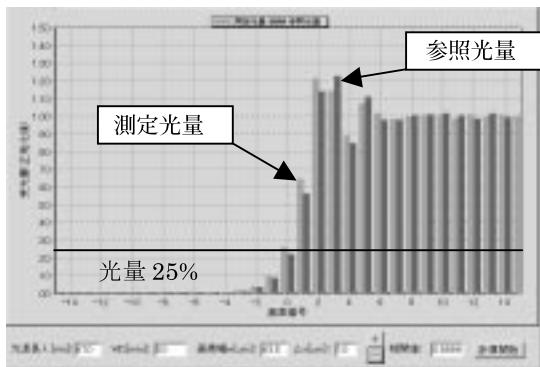


図9. 測定光量と参照光量がずれているとき

参照光量(フレネル回折の近似式)と測定光量の相関では通常の相関(正規化相関)よりもSAD(Sum of absolute difference)相関の方がピークがV字で現れるため効果的である。

$$SAD(\Delta x) = \sum_n |A(x_n + \Delta x) - Y_n| \quad (式4)$$

A:参照光量 Yn:測定光量

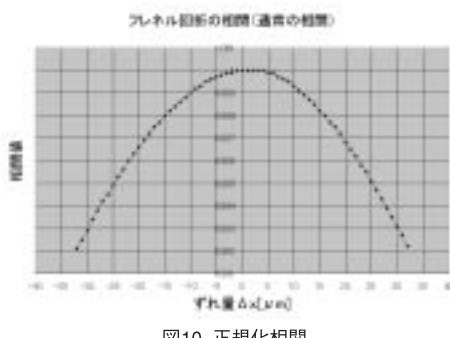


図10. 正規化相関

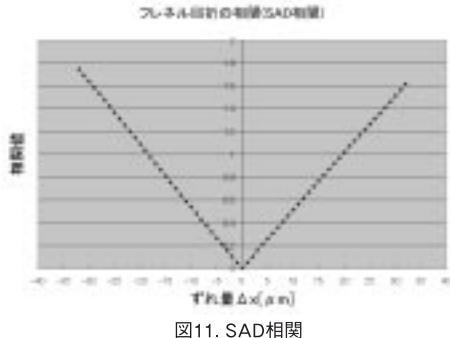


図11. SAD相関

参照光量を求めるには検出体から受光面までの距離zが必要である。zは設定で入力しても良いが調整時に、検出体を置いて、複数回光量分布を測定し、平均をとったあと(ノイズの影響を少なくするため)、光量ピークの画素と25%光量の画素の間の傾きからも計算できる。(式2)をzについて解くと

$$z = \frac{2}{\lambda} \left(\frac{1.98x}{\operatorname{arc sec} h \left(\frac{A(x)}{1.37} \right) + 2.39} \right)^2 \quad (式5)$$

が得られ、25%光量の原点を求めた後、光量ピーク時のAとxからzが計算できる。

画素が粗い場合は光量が画素幅で積分されるので(式2)を積分して

$$x < \frac{\pi}{1.98p} \text{ のとき } B(x) = \frac{2.74}{1.98p} \arctan(e^{1.98px-2.39})$$

$$x \geq \frac{\pi}{1.98p} \text{ のとき } B(x) = x - \frac{1}{4\pi qx} - \frac{\sin qx^2 + \cos qx^2}{2\pi p q x^2}$$

$$\text{ただし } p = \sqrt{\frac{2}{\lambda z}}, \quad q = \frac{\pi}{\lambda z} \quad (式6)$$

が得られ、この不定積分B(x)から各画素で積分された光量を使って参照光量を計算すると粗い画素でも正確にエッジ検出ができる。

$$A(x_n) = B(x_{ne}) - B(x_{ns}) \quad (式7)$$

$A(x_n)$: n番目のセルの積分光量、

x_{ns} : n番目のセルの先頭位置、

x_{ne} : n番目のセルの最終位置

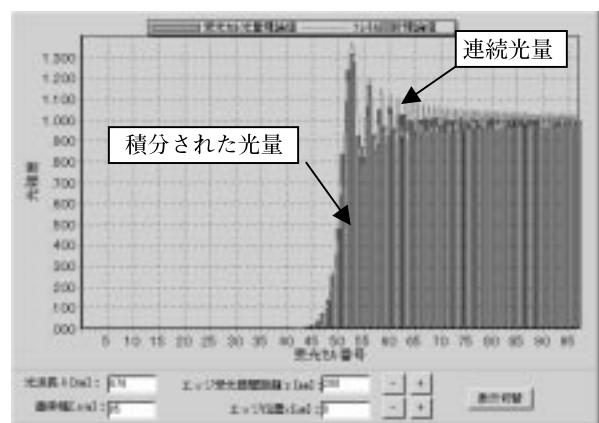


図12. 画素幅で積分された参考光量

相関は全画素行うのではなく、エッジ部分の前後数画素に限定すれば、ガラスのような完全遮光しない場合でもエッジ検出ができるとの計算量が少なくて済む。

4. 不連続な画素の問題

30mm以上もある多画素のイメージセンサは複数のチップがつなぎ合わせており、このつなぎ目の不連続な画素で誤差が発生する。

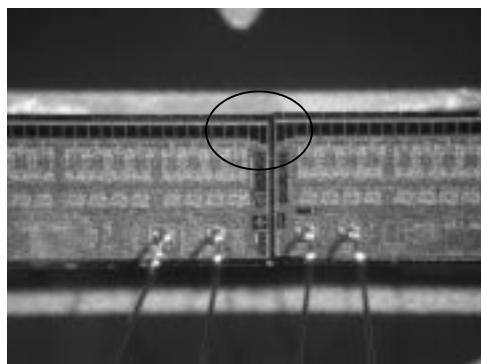


図13.つなぎ目の不連続画素の顕微鏡写真

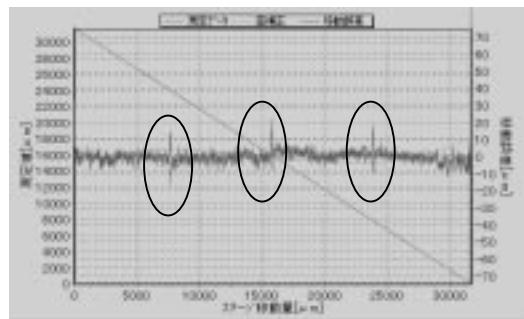


図14. 不連続画素の影響(移動精度)

この誤差は画素のつなぎ目で画素ピッチが変わるために、図13のつなぎ目部分の画素の寸法は下記のようになっていた。通常は $63.5\mu\text{m}$ の画素ピッチである。

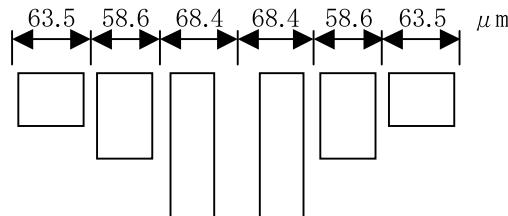


図15. 不連続画素の画素寸法

補間のとき図15の画素寸法で計算すれば、この誤差はそれと考えたが、デジタルフィルタを利かせたり、光量しきい値が25%以外だと逆に誤差は大きくなってしまう。これは図16のようにフィルタやしきい値の影響でエッジ位置が移動し、不連続な画素ピッチと光量が対応しなくなってしまったのである。

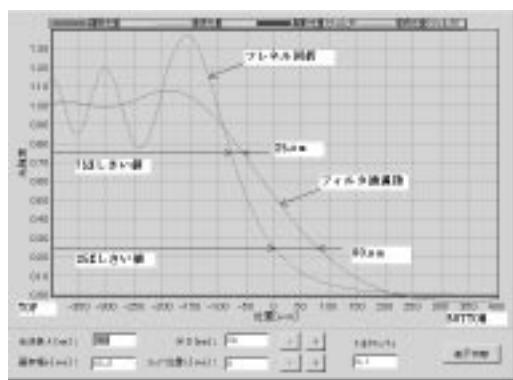


図16. エッジ位置の移動

不連続な画素の測定光量を画素ピッチが等間隔になるように補間で光量を補正したあとデジタルフィルタを通して、指定した光量しきい値の位置を求めるようにすると、図17のようにつ

なぎ目部分のヒゲ状の誤差はとれた。

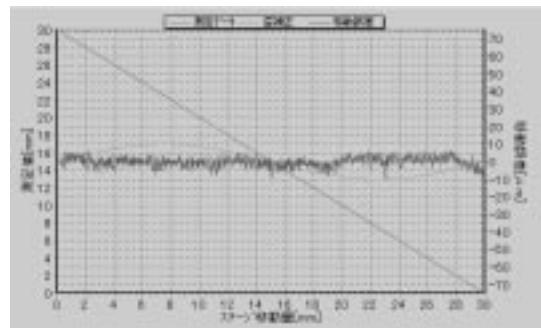


図17. 測定光量を補正後の移動精度

5.レンズの歪曲収差の問題

測定幅が30mmあると、レーザの平行光を作るコリメータレンズは大きなものが必要になるが、コストやスペースの問題で、測定幅に近い大きさの安価なレンズだと歪曲収差の影響で移動精度にS字型の誤差が現れる。この誤差は検出体から受光面までの距離zが大きくなると振幅が大きくなる。

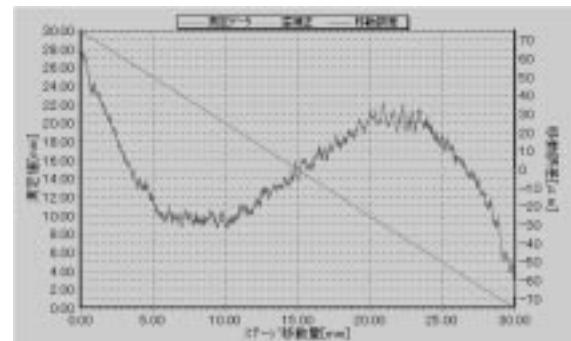


図18. レンズの歪曲収差で発生する誤差

歪曲収差はレンズ中心からの距離の3次式で表されるので下記のような3次多項式で補正したところ図19のようにフラットになった。

$$\Delta X = z^* 0.2 * (0.0013X^3 - 0.0623X^2 + 0.7886X - 2) \quad (式8)$$

ΔX : 補正值(単位 μm) X : 測定値(単位mm)

z : 検出体から受光面までの距離(単位mm)

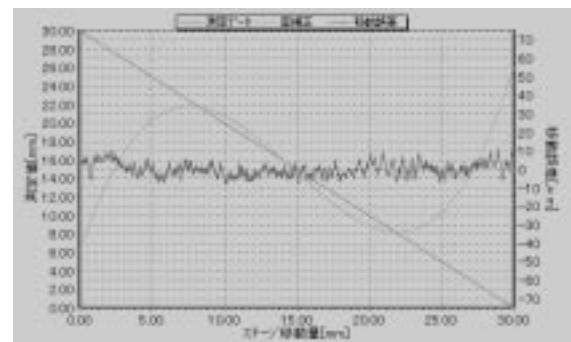


図19. 歪曲収差補正後の移動精度

6.センサ全体がガラスで覆われたときの問題

ガラスのような透明体がセンサ全体を覆った場合は回折パターンが現れないためにセンサ端0mmで検出した位置から急に

最大位置(30mm)に飛んでしまう問題が発生する。



図20. 全入光状態

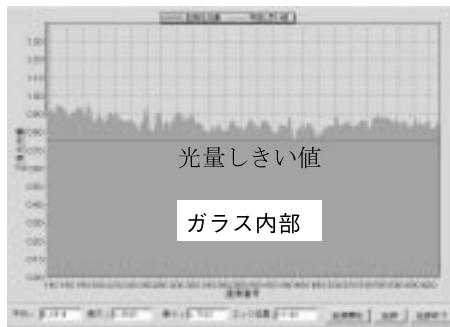


図21. ガラスで全体を覆った状態

図20、図21とも光量がすべてしきい値を越えているためしきい値の判定ではガラスの有無は判断できない。しかし、ガラスで覆われたときは、ガラス表面でレーザ光の反射があるため、全入光状態よりも光量が減ることに着目して、イメージセンサの各画素の光量の加算値(全体光量)を求め、全入光状態の全体光量よりも10%以上減衰していた場合はセンサ全体がガラスで覆われているとして、測定値を0mmにするようにした。

7. X、Y、θの計算

今回開発したエッジセンサは大型のガラスの位置決め用なので、四角形のガラスの隣接する2辺に3つのセンサを取り付けてX、Y、θの位置を検出しなければならない。

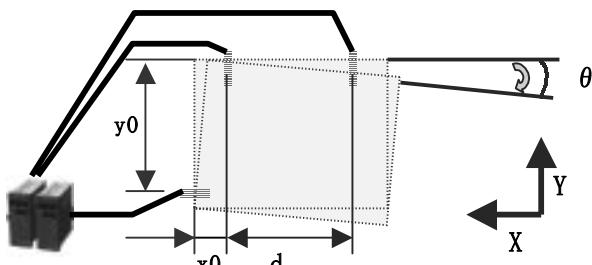


図22. ガラスのX、Y、θ位置決め

3点で測ったエッジ位置から回転角θとθ=0のときのX、Y位置の計算するには回転中心(α, β)が必要である。回転中心は任意に置いたガラスを回転させて、各エッジ位置の変化から計算できる。そのためガラスを少し回転させて回転中心を求めれば回転中心が未知の場合でもθ=0のときのX、Y位置を計算できる。従来はθ=0にしてからX、Y位置を再測定して移動させていたため時間がかかった。

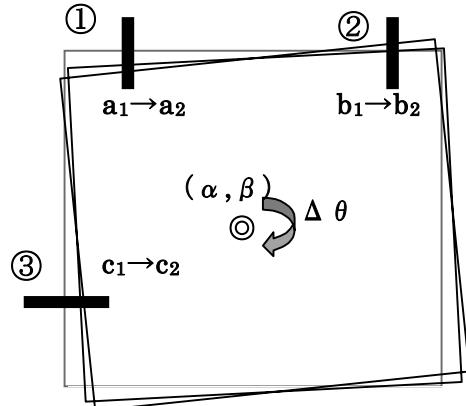


図23. 回転中心の計算

回転中心(α, β)の計算はガラスを回転させて各センサのエッジ位置が $(a_1, b_1, c_1) \rightarrow (a_2, b_2, c_2)$ に変化したとき

$$\theta_1 = \arctan\left(\frac{b_1 - a_1}{d}\right) \quad \theta_2 = \arctan\left(\frac{b_2 - a_2}{d}\right) \quad (\text{式 } 9)$$

$$a_1 \cos \theta_1 + (\alpha - x_0) \sin \theta_1 + \beta (1 - \cos \theta_1) = a_2 \cos \theta_2 + (\alpha - x_0) \sin \theta_2 + \beta (1 - \cos \theta_2)$$

$$c_1 \cos \theta_1 - (\beta - y_0) \sin \theta_1 + \alpha (1 - \cos \theta_1) = c_2 \cos \theta_2 - (\beta - y_0) \sin \theta_2 + \alpha (1 - \cos \theta_2)$$

の連立方程式を(α, β)について解くと求まる。

ただし (x_0, y_0) はセンサ取り付け位置

また回転角θとθ=0のときの位置(X,Y) は各センサのエッジ位置が(a,b,c)の場合

$$\theta = \arctan\left(\frac{b - a}{d}\right)$$

$$X = c \cos \theta - (\beta - y_0) \sin \theta + \alpha (1 - \cos \theta) \quad (\text{式 } 10)$$

$$Y = a \cos \theta + (\alpha - x_0) \sin \theta + \beta (1 - \cos \theta)$$

で計算できるが、どちらも安価なマイコンで計算するには負荷が重すぎる。

そこでSIN、COSを1,2次項まで展開した四則演算だけでできる近似式(式14) (式15)にしてみたが、θをそのまま使うと2~3桁しか合わない。ところがθの代わりに(式13)のθ'を行うと劇的に改善されることがわかった。

$$t = \frac{b - a}{d} \quad (\text{式 } 11) \text{ 傾き}$$

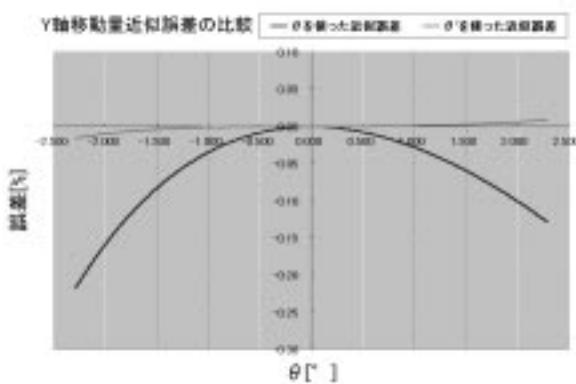
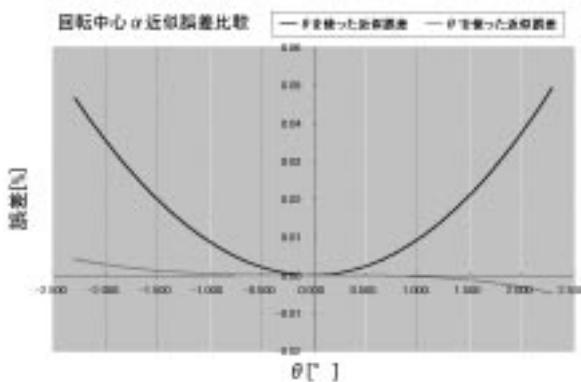
$$\theta \cong t - \frac{t^3}{3} \quad (\text{式 } 12) \text{ 角度 arctan の近似計算}$$

$$\theta' = \frac{-1 + \sqrt{1 + 2t^2}}{t} \quad (\text{式 } 13) \text{ 精度を上げるための変換}$$

$$X \cong c - (\beta - y_0)\theta' + 0.5(\alpha - c)\theta'^2 \quad (\text{式 } 14) X \text{ の近似計算}$$

$$Y \cong a + (\alpha - x_0)\theta' + 0.5(\beta - a)\theta'^2 \quad (\text{式 } 15) Y \text{ の近似計算}$$

θ' を使って近似計算することによりθが±3°の範囲で1/10000以下の精度で計算できるようになった。回転中心の計算も同様に θ' を使って近似式を計算することで4桁以上の精度で計算でき、安価なマイコンで高速に計算できるようになった。

図24. θ と θ' を使ったYの計算誤差の比較図25. θ と θ' を使った回転中心αの計算誤差の比較

8. エッジセンサ仕様

測定距離:20~500mm

測定幅:30mm

角度検出範囲:±3°

測定周期:10ms

温度特性:0.1% F.S./°C

繰り返し精度:±5μm

移動精度:±50μm

出力:0~30mmを1~5Vまたは±5Vでアナログ出力

アナログ出力分解能:±20μm

リニアリティ(直線性):0.5% F.S.

スルーレート:10V/ms

位置表示分解能:1μm

角度表示分解能:1/10000°

応答時間:出力遅延時間(設定値)+20ms



図26. コントローラ接続端子

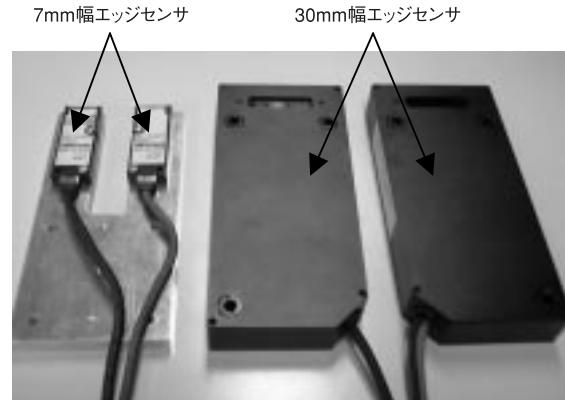


図27. 従来のセンサヘッドとの比較



図28. コントローラ

参考文献

1. 山武セーブメーションレビュー2004年8月号「エッジセンサの開発」
2. 山武セーブメーションレビュー2005年2月号「結像光学系エッジセンサの開発」
3. 数学公式集Ⅲ 森口繁一、宇田川、一松信 岩波全書
4. サイエンスライブラリ物理学9「光学」村田和美 サイエンス社
5. パウリ物理学講座「光学と電子論」岡崎誠 大高一雄 講談社4応用光学I 鈴木達郎 朝倉書店
6. 光工学 飯塚啓吾 共立出版
7. 波動工学入門 合田軍太夫 東京電機大学出版
8. デジタル信号処理 電子通信学会
9. 特願P2004-177335 「位置検出および装置」
10. 特願P2005-249220 「エッジ検出装置」
11. 特願P2005-340296 「エッジ検出方法およびエッジ検出装置」
12. 特願P2006-003598 「エッジ検出方法およびエッジ検出装置」
13. 特願P2006-040756 「位置検出方法および位置合わせ方法」
14. 特願P2006-260614 「エッジセンサ、位置検出方法および位置合わせ方法」

15. 特願P2006-274900「ファームウェアテスト自動化方法」
16. 特願P2006-283822「エッジ検出装置」
17. エッジセンサコントローラ取扱説明書CP-SP-1155
18. エッジセンサセンサヘッド取扱説明書CP-UM-5312

著者所属

| | |
|-------|--------------------|
| 岡山 喜彦 | アドバンスオートメーションカンパニー |
| | 開発1部 |
| 越 俊樹 | アドバンスオートメーションカンパニー |
| | 開発1部 |
| 加納 史郎 | アドバンスオートメーションカンパニー |
| | 開発1部 |