

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年6月4日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560130

研究課題名（和文） 多点法による形状測定における誤差要因の解明と除去

研究課題名（英文） Error analysis and reduction in profilometry using multi-probe methods

研究代表者

久米 達哉 (KUME TATSUYA)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・機械工学センター・研究機関講師

研究者番号：40353362

研究成果の概要（和文）：多点法による形状測定において、2点法、3点法、ステッチングによる導出形状に対する誤差見積り値と実験値との間に良好な一致が見られ、それらの妥当性が示された。また、従来の検討において問題とされた系統的な形状差が、測定位置に関わる誤差に起因する可能性が高いことが示された。さらに、3点法に用いられる3つの変位計間のゼロ点ずれの変動を、変位計の持つ分解能と同程度の安定性で検出し、除去できることが実験的に示された。

研究成果の概要（英文）：The estimated errors for the profiles obtained by 2-point method, 3-point method, and stitching agree well with the experimental values and it shows validity for our error estimation. It also shows that the systematic error shown in the measurements by using our profile measurement system adopting zero-adjustment method, which prevents zero difference between the three displacement meters for 3-point method affecting the measurements, can be caused by error in the measurement positions. Furthermore, it was experimentally shown that the fluctuation of the zero difference can be detected and compensated with the stability equal to the resolution of the displacement meters.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,900,000	570,000	2,470,000
2011年度	1,300,000	390,000	1,690,000
2012年度	400,000	120,000	520,000
年度			
年度			
総計	3,600,000	1,080,000	4,680,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：機械工学・生産工学・加工学

キーワード：形状測定、誤差伝播、多点法、ステッチング、ゼロ点ずれ

## 1. 研究開始当初の背景

多点法による形状測定は、一般的な形状測定において必要とされる形状基準を不要とすることから、形状基準の精度や大きさに制限されることのない、高精度かつ大規模な形状測定を実現する可能性を持っている。しかし、これらを現実の形状測定に適用し、期待

されるような高精度な形状測定を実現するには、多点法では除去することのできない誤差成分を除去または低減する必要がある。

測定における誤差は一般に偶然誤差成分と系統誤差成分に分類される。前者の偶然誤差成分は除去不能な誤差成分であり、その影響は平均化によってのみ低減される。多点法

では、多数の測定値をもとに形状を導出することから、その形状導出過程において誤差が蓄積され増加する一方で、偶然誤差成分の平均化により、その影響が低減される。これらの効果は、測定条件により変化するため、測定条件を最適化する必要がある。しかし、多点法による形状測定において、高い精度で誤差見積もりが可能な誤差解析モデルが示され、装置設計に適用された例は無く、それを確立することが実用化する上での課題となっている。

一方、後者の系統誤差成分は校正などによって除去することが可能であるが、一般的に系統誤差成分を高精度に検出し、除去することは困難である。さらに、多点法では、その形状導出過程において、系統誤差成分が拡大されると、大きな形状誤差を引き起こす可能性があることから、極微量であっても無視できない。

研究代表者らは、ゼロ点調整法 (W. Gao, et.al., Precision Eng., 26-3, 279) を適用した多点法による形状測定法において、その形状導出過程を見直すことで、系統誤差成分であるゼロ点ずれを、各測定点毎に抽出することを可能とし、作成した形状測定機においてゼロ点ずれが変動していることを示した。さらに、その変動に繰返し性がある場合、ゼロ点ずれが完全に除去されることを、解析と実験により示した (久米ら, 精密工学会誌, 75, 5, 657)。しかし、繰返し性の無い一般的なゼロ点ずれの変動は、この手法により除去されず、その除去方法の確立が、課題として残された。

その一方で、研究代表者らの作成した形状測定器では、従来の誤差解析モデルでは説明することのできない、系統性のある形状差が検出され、更なる高精度を実現するには、この形状差の発生要因が説明できる、新たな誤差解析モデルが必要と考えられた。

## 2. 研究の目的

本研究計画では、多点法を用いて高精度な形状測定を実現するため、

(1).高精度な誤差見積もりが可能な誤差解析モデルの確立、

(2). 従来の誤差解析モデルでは説明することのできない、系統性のある形状差の発生メカニズムの解明と、新たな誤差解析モデルの確立、

(3). 繰返し性の無い、より一般的なゼロ点ずれの変動除去方法の確立  
の3つを目的とする。

## 3. 研究の方法

本研究の目的として設定した3つの課題は、それぞれ独立に検討することが可能である。この中で、最も難易度が高い課題と考えられるのは、(3).繰返し性の無い、より一般的なゼ

ロ点ずれの変動除去方法の確立、と予想されることから、計画初年度から実現方法の検討を始め、その原理検証のための実験装置を作成し、有効性を実証する。

その一方で、(1).高精度な誤差見積もりが可能な誤差解析モデルの確立と、(2). 従来の誤差解析モデルでは説明することのできない、系統性のある形状差の発生メカニズムの解明と、新たな誤差解析モデルの確立、については、従来の多点法による形状測定結果や、別途、研究代表者らが検討を行っている、ステッチングによる形状連結、傾斜計を用いた形状測定(2点法)などにおける測定結果を交え、従来考慮していなかった装置送り方向の誤差などを考慮した誤差解析モデルによる見積り値との比較を通して、(3)とは独立して検討を行う。

## 4. 研究成果

(1).高精度な誤差見積もりが可能な誤差解析モデルの確立、に関して、水準器を用いた形状測定法(2点法)(図1)やゼロ点調整法を適用した3点法(図3)に代表される多点法と、測量ネットワークに代表されるステッチングによる形状連結法(図2)について、誤差解析モデルに基づき、導出形状に伝播する誤差を見積り、実験値との比較から見積り値と誤差解析モデルの妥当性を検証した。その結果、実験値との良好な一致が見られ、見積り方法と見積り値の妥当性が示された。

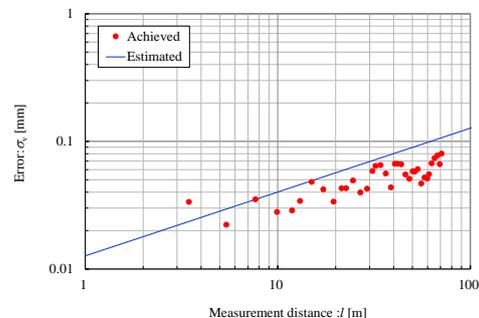


図1.水準器を用いた形状測定法(2点法)における誤差(標準偏差)実測値(Achieved)と見積り値(Estimated)

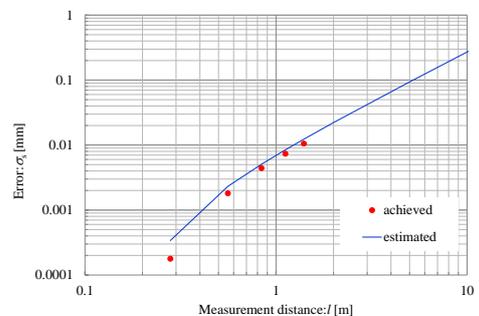


図2.ステッチングによる形状導出における誤差(標準偏差)実測値(Achieved)と見積り値(Estimated)

(2). 従来の誤差解析モデルでは説明することのできない、系統性のある形状差の発生メカニズムの解明と、新たな誤差解析モデルの確立、に関して、従来の誤差見積りにおいて検討されていなかった送り方向の誤差の影響(図3)が、3点法の場合無視できなくなることが示された。そのため、これまで問題となってきた繰り返し性のある形状差(系統誤差)の原因である可能性が高いとの見通しが得られた。当該誤差要因の検討と除去については、さらなる検討を要する。

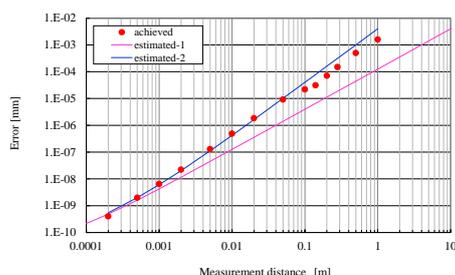


図3.3点法による形状導出における誤差(標準偏差)実測値(Achieved)と見積り値、estimated-1は、送り方向の誤差を考慮しない場合、estimated-2は、送り方向の誤差を考慮した場合の見積り値を示す

(3). 繰り返し性の無い、より一般的なゼロ点ずれの変動除去方法の確立、に関して、500 mm 程度の間隔で設置された3台の変位計間の変位検出方向の相対位置(ゼロ点ずれ)の変動を検出するための基礎実験装置を設計・製作し、これを用いた実験的な検討を行った。ここでは新たに考案した3本のレーザビームを用いた方法により、当初計画していた2本のビームを用いた方法では除去することができなかった、ビーム偏向の影響を除去可能とすることで、検証実験装置において発生したゼロ点ずれの  $0.3 \mu\text{m}$  程度の日周期変動を検出することができた(図4)。この値は、変位計に見込まれる測定値の標準偏差  $0.1 \mu\text{m}$  と比較して無視できない値であり、多点法を用いた形状測定において、ゼロ点ずれの変動が無視できないこと、さらに、当該方法により 100 nm を切る分解能で、安定的にゼロ点ずれの変動検出・除去が可能であることが示された。

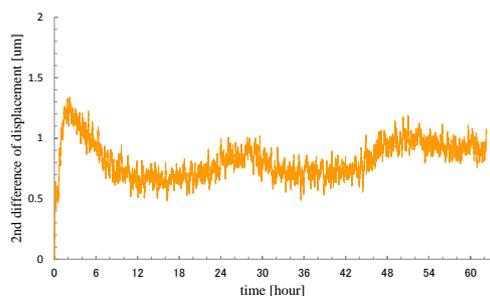


図4.検出されたゼロ点ずれの時間変動、振幅  $0.3 \mu\text{m}$  程

度の日周期変動がみられる

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 13 件)

① T.Kume, E.Okuyama, M.Satoh, T.Suwada, and K.Furukawa, "Large-scale Accelerator Alignment Using an Inclinometer," Precision Engineering, Accepted (2013), <http://dx.doi.org/doi:10.1016/j.precisioneng.2013.03.009>, 査読あり.

② 久米, 江並, 東, 上野, 山中, "多点法による形状測定におけるゼロ点ずれ除去方法の検討(第3報)ーゼロ点ずれ変動検出方法の改良ー," 2013年度精密工学会春季大会予稿集, N46, (2013), 査読なし.

③ T.Kume, E.Okuyama, M.Satoh, T.Suwada, and K.Furukawa, "Evaluation of the alignment for long linear accelerators using a level," 第9回日本加速器学会年会 2012 予稿集, WEPS130, (2012), 査読なし.

④ 久米, 江並, 東, 山中, 上野, "大型対象物の形状測定における偶然誤差の蓄積," 2012年度精密工学会春季大会予稿集, F19, (2012), 査読なし.

⑤ 久米, 江並, 東, 上野, "多点法による形状測定におけるゼロ点ずれ除去方法の検討-第2報 ゼロ点ずれ変動監視機構の検討," 2011年度精密工学会秋季大会予稿集, N69, (2011), 査読なし.

⑥ 久米, 奥山, 佐藤, 諏訪田, 古川, "水準器を用いた床面変動測定," 第8回加速器学会年会予稿集, MOPS156, (2011), 査読なし.

⑦ T.Kume, K.Enami, Y.Higashi, and K.Ueno, "Error estimation for the stitched profile in straightness measurement," euspen 2011, p.2.45, (2011), 査読なし.

⑧ 久米, 江並, 東, 上野, "多点法による形状測定におけるゼロ点ずれ除去方法の検討-繰り返し性の無い変動をするゼロ点ずれの除去," 2011年度精密工学会春季大会予稿集, K06, (2011), 査読なし.

⑨ 久米, 江並, 東, 上野, "ステッチング法を用いた形状測定における誤差伝搬(第2報)-誤差伝搬モデルの見直し," 2010年度精密工学会秋季大会予稿集, H14, (2010), 査読なし.

⑩ T.Kume, E.Okuyama, M.Satoh, T.Suwada, K.Furukawa, "Straightness evaluation for the KEK electron/positron linac using a level," IWAA2010, (2010), 査読なし.

⑪ T.Kume, E.Okuyama, M.Satoh, T.Suwada, K.Furukawa, "Long distance straightness measurement using a level," ISMQC 2010, F6, (2010), 査読なし.

⑫ 久米, 奥山, 佐藤, 諏訪田, 古川, "水準器を用いた KEK 入射器の真直度測定," 第7回加

速器学会年会予稿集, THPS121, (2010), 査読なし.

⑬ T.Kume, E.Okuyama, M.Satoh, T.Suwada, K.Furukawa, "Straightness alignment of linac by detecting slope angle, " IPAC10, WEPEB055, (2010), 査読なし.

[学会発表] (計 13 件)

① 久米, 江並, 東, 上野, 山中, "多点法による形状測定におけるゼロ点ずれ除去方法の検討 (第3報)ーゼロ点ずれ変動検出方法の改良ー," 2013 年度精密工学会春季大会, N46, 東工大, 東京都目黒区, Mar.14, (2013).

② T.Kume, E.Okuyama, M.Satoh, T.Suwada, and K.Furukawa, "Straightness evaluation for the 206-m-long part of the KEK electron/positron linac using inclinometers, " IWAA2012, Batavia, IL., USA, Sep.10-14, (2012).

③ T.Kume, E.Okuyama, M.Satoh, T.Suwada, and K.Furukawa, "Evaluation of the alignment for long linear accelerators using a level, " 第9回日本加速器学会年会 2012, WEPS130,大阪大, 豊中市, Aug.8-10, (2012).

④ 久米, 江並, 東, 山中, 上野, "大型対象物の形状測定における偶然誤差の蓄積, " 2012 年度精密工学会春季大会, F19, 首都大, 八王子市, Mar.14, (2012).

⑤ 久米, 江並, 東, 上野, "多点法による形状測定におけるゼロ点ずれ除去方法の検討-第2報 ゼロ点ずれ変動監視機構の検討, " 2011 年度精密工学会秋季大会, N69, 金沢大, 金沢市, Sep.22, (2011).

⑥ 久米, 奥山, 佐藤, 諏訪田, 古川, "水準器を用いた床面変動測定, " 第8回日本加速器学会年会, MOPS156, つくば市, Aug.1, (2011).

⑦ T.Kume, K.Enami, Y.Higashi, and K.Ueno, "Error estimation for the stitched profile in straightness measurement, " euspen 2011, p2.45, Como, Italy, May 25, (2011).

⑧ 久米, 江並, 東, 上野, "多点法による形状測定におけるゼロ点ずれ除去方法の検討-繰返し性の無い変動をするゼロ点ずれの除去, " 2011 年度精密工学会春季大会, K06, 東洋大, 東京都文京区, Mar.14, (2011).

⑨ 久米, 江並, 東, 上野, "ステッピング法を用いた形状測定における誤差伝搬(第2報)-誤差伝搬モデルの見直し, " 2010 年度精密工学会秋季大会, H14, 名古屋大, 名古屋市, Sep.27, (2010).

⑩ T.Kume, E.Okuyama, M.Satoh, T.Suwada, K.Furukawa, "Straightness evaluation for the KEK electron/positron linac using a level, " IWAA2010, Hamburg, Germany, Sep.16, (2010).

⑪ T.Kume, E.Okuyama, M.Satoh, T.Suwada, K.Furukawa, "Long distance straightness measurement using a level, " ISMQC 2010, F6,

大阪大, 吹田市, Sep.8, (2010).

⑫ 久米, 奥山, 佐藤, 諏訪田, 古川, "水準器を用いた KEK 入射器の真直度測定, " 第7回日本加速器学会年会, THPS121, 姫路市, Aug.5, (2010).

⑬ T.Kume, E.Okuyama, M.Satoh, T.Suwada, K.Furukawa, "Straightness alignment of linac by detecting slope angle, " IPAC10, WEPEB055, Kyoto, May 25, (2010).

[産業財産権]

○出願状況 (計 3 件)

①名称: 形状測定装置及び形状測定方法

発明者: 久米 達哉

権利者: 高エネルギー加速器研究機構

種類: 特許

番号: 特願 2013-001861

出願年月日: 2013 年 1 月 9 日

国内外の別: 国内

②名称: 方向検出装置

発明者: 久米 達哉

権利者: 高エネルギー加速器研究機構

種類: 特許

番号: 特願 2010-105707 (特開 2011-232309)

出願年月日: 2010 年 4 月 30 日

国内外の別: 国内

6. 研究組織

(1)研究代表者

久米 達哉 (KUME TATSUYA)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・機械工学センター・研究機関  
講師

研究者番号: 40353362