

画像処理による非接触変形・応力計測法の開発

大阪府立大学院 工学研究科 航空宇宙海洋系専攻 正岡研究室 山口 晃司

研究背景

デジタルカメラを用いた構造物の変形・応力計測

| 適用例 | 利点 |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> ・コンクリート構造物、鉄鋼構造物の非破壊診断 ・構造物材料である木材のひずみ計測 ・レール等の鉄道構造物の変形 | <ul style="list-style-type: none"> ・非接触 ・得られる情報量が非常に多い ・簡便 ・安価 |

問題点
単純な画像相関法では応力の計測精度が不十分

本研究
残差力による修正変位法により高精度化した画像処理による非接触変形・応力計測法の開発

画像処理による非接触変形・応力計測法

本手法の流れ

デジタルカメラで撮影した変形前・後画像

画像処理による変形計測

- ・画像相関法 (残差自乗和相関)
- ・サブピクセル変形計測

応力解析

- ・FEMによる解析
- ・残差力による修正変位法

画像処理による変形計測

- ① 比較画像領域 $A_{00}(x,y), A_{00}(x,y)$ を同サイズ $dx \times dy$ で設定
- ② 変形後画像の比較画像領域 $A_{mm}(x+m_y, y+m_x)$ をずらしながら順次設定
- ③ 各々の領域の輝度相関値 $r(x+m_y, y+m_x) = \|A_{00}(x,y) - A_{mm}(x+m_y, y+m_x)\|$ により求める。

輝度相関値が最小時の (m_x, m_y) :
ピクセル変位量 (u, v)

サブピクセル変形計測

- ① ピクセル変位解に隣接するx, y方向3×3の輝度相関値から**最小二乗曲面**を作成
- ② 最小二乗曲面の最小値 = 変形後座標

変形後座標 - 変形前座標 = **サブピクセル変位量** (u, v)

変形・応力計測の精度検証

3点曲げ試験による変形計測の精度検証

実験モデル

負荷荷重: $F=60, 112, 167, 212$ (kgf)
材料: アルミニウム合金 (A6063S)
デジタルカメラの画素数: 1212万画素

実験風景

- ・理論変位分布と計測変位分布は**良好に一致**
- ・誤差は最大で**20 μ m**程度

変形計測結果

変位分布 (変形計測結果)

変位量 (mm) vs x方向座標 (mm)

理論変位と計測変位の比較

円孔を有する帯板の引張り試験による応力計測の精度検証

試験片の形状・寸法

理論値と応力計測値の誤差:
2~3kgf/mm²

応力計測結果

Y方向応力分布 (F=600kgf)

理論値と応力計測値の比較

残差力による修正変位法

画像から得られた変位場が正しいなら $[K]\{u^{ex}\} = \{f\}$ が成立

$[K]$: 剛性マトリックス, $\{f\}$: 節点力ベクトル

$\{u^{ex}\}$ は一般に誤差を含むので $\{f\} - [K]\{u^{ex}\} \neq 0$

$[R] = \{f\} - [K]\{u^{ex}\}$ (残差力 $[R]$ とおく)

画像周辺境界部 $\{u^{mod}\} = 0$ と仮定

$\{u^{mod}\} = [K]^{-1}\{R\}$ (修正変位ベクトル $\{u^{mod}\}$)

$\{u\} = \{u^{ex}\} + \{u^{mod}\}$

変位ベクトル $\{u\}$ から得られる修正応力場

- ① 画像の周辺変位の境界条件を満足
- ② 構造物内部の力の釣り合いを満足

$\{u^{ex}\}$: 実験により得られた変位ベクトル
 $\{u^{mod}\}$: 修正変位ベクトル

残差力による修正変位法を用いた応力計測結果

(平均化処理前) → (平均化処理後) → (平均化処理+修正変位法)

Y方向応力分布

理論値と応力計測値の比較

高精度の応力計測を実現

理論値と応力計測値の誤差
1kgf/mm²精度を実現

溶接変形の計測への適用

実験風景

速度: 100mm/min
電圧: 17V
電流: 70A~110A
熱効率: 0.4

y方向変位分布(90Aの場合)

変位量 (mm) vs x方向座標 (x/L)

画像処理による変形計測結果 (横収縮)

FEM熱弾塑性解析結果 (横収縮)

結果は変形傾向・変形量ともに**ほぼ一致**

結論と今後

結論

- ・画像相関法を用いることで、**高精度の変形計測が可能**であることを確認した。
- ・本手法を用いることで、円孔を有する帯板の引張りにおいて、**1kgf/mm²程度の精度で応力計測が可能**であることが分かった。
- ・残差力による**修正変位法**を用いることで、応力の計測の精度が**大幅に向上**することを確認した。

今後の展望

- ・構造物の**非破壊診断**に利用できる。
- ・高精度**固有変形・残留応力推定**に利用できる。