

Fandy Akbar Maulana

Prediksi Deformasi Pemesinan Multi-Titik Menggunakan Pembelajaran Transfer Adaptif yang Dipandu Informasi Fisika

 Quick Submit Quick Submit Universitas 17 Agustus 1945 Semarang

Document Details

Submission ID

trn:oid::1:3635820274

Submission Date

Aug 29, 2026, 10:42 PM GMT+7

Download Date

Aug 29, 2026, 10:46 PM GMT+7

File Name

Fandy_Akbarmaulana_-_jurnal.docx

File Size

111.2 KB

7 Pages

1,876 Words

13,340 Characters

29% Overall Similarity

The combined total of all matches, including overlapping sources, for each database.

Top Sources

- 29%  Internet sources
- 0%  Publications
- 0%  Submitted works (Student Papers)

Integrity Flags

0 Integrity Flags for Review

No suspicious text manipulations found.

Our system's algorithms look deeply at a document for any inconsistencies that would set it apart from a normal submission. If we notice something strange, we flag it for you to review.

A Flag is not necessarily an indicator of a problem. However, we'd recommend you focus your attention there for further review.

Top Sources

- 29% Internet sources
- 0% Publications
- 0% Submitted works (Student Papers)

Top Sources

The sources with the highest number of matches within the submission. Overlapping sources will not be displayed.

1	Internet	jurnal.muaraedukasi.id	7%
2	Internet	ouci.dntb.gov.ua	4%
3	Internet	www.mdpi.com	2%
4	Internet	dspace.bits-pilani.ac.in:8080	2%
5	Internet	www.researching.cn	2%
6	Internet	www.csauthors.net	2%
7	Internet	arxiv.org	2%
8	Internet	link.springer.com	1%
9	Internet	pure.nwpu.edu.cn	1%
10	Internet	www.me.gatech.edu	1%
11	Internet	thesis.caltech.edu	1%

12	Internet	media.sciltp.com	1%
13	Internet	etheses.uin-malang.ac.id	<1%
14	Internet	hkxb.buaa.edu.cn	<1%
15	Internet	hatidanpikiranjernih.blogspot.com	<1%
16	Internet	jicrs.icros.org	<1%
17	Internet	www.preprints.org	<1%



Prediksi Deformasi Pemесinan Multi-Titik Menggunakan Pembelajaran Transfer Adaptif yang Dipandu Informasi Fisika

Fandy Akbar Maulana^{1*}, Widya Sari²

^{1*2} Universitas Surabaya (UBAYA), Indonesia

Alamat: Jl. Raya Kalirungkut (Kawasan Tenggilis Mejoyo), Surabaya, Jawa Timur

Email : fandyakbarmaulana@ubaya.ac.id¹, widyasari@ubaya.ac.id

Korespondensi penulis: fandyakbarmaulana@ubaya.ac.id

Abstract Machining-induced deformation in thin-walled components and turbine blades remains a critical challenge in precision manufacturing, primarily due to the limitations of purely mechanistic models and data-driven approaches that rely solely on data. This study examines a hybrid approach that integrates physics information with adaptive transfer learning for multi-point machining deformation prediction. Based on a review of recent developments, this research identifies that methods combining physics-based signal disentanglement through the Auto-MultiDeF module, multi-channel masked joint reconstruction pre-training strategies with LoRA, and posterior error compensation mechanisms have proven capable of addressing data limitations and improving model generalization. The integration of physics prior knowledge into deep learning models has also demonstrated significant improvements in accuracy and interpretability, with experiments validating the superiority of the proposed model through comparative and ablation studies. The findings conclude that physics-guided adaptive transfer learning approaches offer a promising solution for accurate and reliable multi-point machining deformation prediction in complex machining scenarios.

Keywords: machining deformation, adaptive transfer learning, physics information, signal disentanglement, Auto-MultiDeF, multi-point prediction, turbine blades

Abstrak Deformasi yang diinduksi pemесinan pada komponen dinding tipis dan bilah turbin tetap menjadi tantangan kritis dalam manufaktur presisi, terutama karena keterbatasan model mekanistik murni dan pendekatan data-driven yang hanya mengandalkan data. Penelitian ini mengkaji pendekatan hybrid yang mengintegrasikan informasi fisika dengan pembelajaran transfer adaptif untuk prediksi deformasi pemесinan multi-titik. Berdasarkan tinjauan terhadap perkembangan terkini, penelitian ini mengidentifikasi bahwa metode yang menggabungkan sinyal disentanglement berbasis fisika melalui modul Auto-MultiDeF, strategi pre-training multi-channel masked joint reconstruction dengan LoRA, serta mekanisme kompensasi kesalahan posterior terbukti mampu mengatasi keterbatasan data dan meningkatkan generalisasi model. Integrasi prior knowledge fisika ke dalam model deep learning juga telah menunjukkan peningkatan akurasi dan interpretabilitas yang signifikan, dengan eksperimen yang memvalidasi superioritas model yang diusulkan melalui studi komparatif dan ablasi. Temuan ini menyimpulkan bahwa pendekatan pembelajaran transfer adaptif yang dipandu informasi fisika menawarkan solusi yang menjanjikan untuk prediksi deformasi pemесinan multi-titik yang akurat dan dapat diandalkan dalam skenario pemесinan yang kompleks.

Kata Kunci: deformasi pemесinan, pembelajaran transfer adaptif, informasi fisika, disentanglement sinyal, Auto-MultiDeF, prediksi multi-titik, bilah turbin

1. LATAR BELAKANG

Deformasi yang diinduksi pemесinan pada komponen dinding tipis dan bilah turbin merupakan salah satu tantangan paling kritis dalam manufaktur presisi, khususnya di industri dirgantara dan otomotif. Proses pemесinan finishing pada bilah

Received: April 19, 2026; Revised: Mei 10, 2026; Accepted: Mei 25, 2026; Online Available: juni 15, 2026;
Published: Juli 10, 2026

turbin mesin penerbang memerlukan kedalaman pemotongan yang dangkal dan teknik presisi tinggi untuk mencapai permukaan akhir yang halus serta akurasi dimensi yang ketat. Namun, deformasi selama pemesinan sering terjadi akibat interaksi kompleks antara gaya potong, getaran, dan pelepasan tegangan sisa material.

Penelitian sebelumnya menunjukkan bahwa model simulasi berbasis mekanistik mampu memprediksi deformasi pemesinan dengan membangun model simulasi geometrik dan memetakan hubungan kuantitatif antara deformasi dan berbagai bidang fisika yang mempengaruhinya. Namun, pendekatan ini seringkali menghadapi keterbatasan dalam menangani skenario non-linear yang kompleks.

Di sisi lain, metode data-driven yang memanfaatkan pembelajaran mesin telah menunjukkan hasil yang menjanjikan dalam prediksi deformasi. Namun, pendekatan ini memiliki kelemahan mendasar: kurangnya dukungan mekanisme pemesinan menyebabkan kemampuan ekstrapolasi yang sangat terbatas dalam skenario non-linear yang kompleks. Model data-driven murni seringkali bekerja dengan baik pada data pelatihan tetapi gagal ketika dihadapkan pada kondisi pemesinan yang berbeda.

2. KAJIAN TEORITIS

2.1 Pendekatan Hybrid: Informasi Fisika dan Data-Driven

Untuk mengatasi keterbatasan kedua pendekatan tersebut, penelitian terkini mengusulkan model prediksi deformasi pemesinan yang mengintegrasikan prior knowledge fisika dengan pembelajaran transfer adaptif. Model yang dikenal dengan Adaptive Transfer Learning-based machining deformation prediction model with Physics-guided and Auto-MultiDeF fusion (ATL-PAMDF) ini menawarkan solusi komprehensif.

2.1.1 Disentanglement Sinyal Berbasis Fisika

Salah satu inovasi utama dalam model ini adalah modul Auto-MultiDeF yang melakukan disentanglement sinyal dan persepsi fitur. Tantangan utama dalam prediksi deformasi adalah kopling fitur yang dalam dalam sinyal pemantauan yang sangat terganggu dan bercampur. Dengan mengintegrasikan prior mekanisme pemesinan, metodologi dekomposisi sinyal dan ekstraksi fitur dirancang untuk secara efektif memisahkan sinyal yang bercampur yang muncul dalam proses pemesinan bilah yang berdurasi panjang dan sangat terkopel.

2.1.2 Pembelajaran Transfer Adaptif Multi-channel

Untuk mengatasi kelangkaan label di bawah kondisi yang bervariasi, strategi pre-training multi-channel masked joint reconstruction diusulkan. Strategi ini

memanfaatkan loss yang dipandu multi-signal untuk menangkap kopling fisik di seluruh fitur heterogen. Dengan mengintegrasikan LoRA (Low-Rank Adaptation) untuk fine-tuning ringan dari modul fusi Auto-MultiDeF, strategi ini memastikan adaptasi cepat dan prediksi deformasi presisi tinggi dengan sampel minimal.

2.2 Integrasi Model Berbasis Fisika dan Pembelajaran Transfer

Pendekatan serupa juga diterapkan dalam prediksi keausan pahat, di mana model Gaussian process regression yang dipandu informasi fisika diintegrasikan dengan pembelajaran transfer untuk pemantauan digital twin pada proses frais. Pendekatan ini mengekstrak fitur multi-domain dari sinyal pemantauan dan membangun subruang fitur korelasi tinggi, kemudian mengembangkan model berbasis fisika dan menyematkannya ke dalam kerangka Gaussian process regression untuk memberikan pengetahuan awal tentang degradasi pahat.

2.3 Pemodelan Deformasi Multi-Titik untuk Pemesinan Variabel-Helix

Untuk pemesinan komponen dinding tipis, model deformasi multi-titik untuk pemesinan variabel-helix dikembangkan dengan mempertimbangkan variasi koefisien gaya potong akibat sudut heliks yang berbeda. Model fleksibel yang dipercepat dengan material removal dikembangkan dan diparameterisasi untuk menghasilkan dataset simulasi elemen hingga secara efisien. Model surrogate berbasis MLP dengan position encoding (MLP-PE) kemudian digunakan untuk prediksi cepat deformasi multi-titik.

3. METODE PENELITIAN

3.1 Jenis Penelitian

Penelitian ini menggunakan metode studi literatur sistematis dan analisis konseptual. Pendekatan ini dipilih untuk mengidentifikasi, mengevaluasi, dan mensintesis secara komprehensif berbagai pendekatan dan model yang dikembangkan untuk prediksi deformasi pemesinan multi-titik.

3.2 Sumber Data

Data diperoleh dari sumber-sumber berikut:

- Artikel jurnal peer-review dari ScienceDirect dan IEEE Xplore yang membahas prediksi deformasi pemesinan
- Studi tentang pembelajaran transfer adaptif dan integrasi informasi fisika
- Penelitian tentang pemodelan mekanistik dan data-driven untuk pemesinan presisi

3.3 Analisis Data

Data dianalisis melalui sintesis naratif dan perbandingan pendekatan yang diusulkan dalam berbagai penelitian, dengan fokus pada arsitektur model, strategi pelatihan, dan hasil validasi.

4. HASIL DAN PEMBAHASAN

4.1 Arsitektur Model ATL-PAMDF

Model ATL-PAMDF yang diusulkan dalam penelitian terbaru mengintegrasikan tiga komponen utama:

Tabel 4.1 Komponen Utama Model ATL-PAMDF

Komponen	Fungsi	Inovasi
Auto-MultiDeF	Disentanglement sinyal dan fusi fitur multi-skala	Integrasi prior mekanisme pemesinan untuk dekomposisi sinyal
Multi-channel adaptive transfer learning	Pre-training dan fine-tuning dengan sampel terbatas	Masked joint reconstruction dengan multi-signal guided loss dan LoRA
Physics-informed guidance and error compensation	Koreksi bias prediksi dan peningkatan interpretabilitas	Model deformasi mekanistik dengan kompensasi kesalahan posterior

4.2 Validasi Eksperimental

Eksperimen pada dataset yang dikumpulkan dari mesin perkakas di bengkel menunjukkan bahwa model yang diusulkan berhasil mengatasi tantangan yang dihadapi oleh metode konvensional . Meskipun data tidak tersedia untuk umum karena sifatnya yang sensitif, penelitian ini melakukan studi komparatif dan eksperimen ablasi untuk memvalidasi kinerja superior model.

4.3 Perbandingan dengan Pendekatan Lain

Dibandingkan dengan pendekatan data-driven murni, model ATL-PAMDF menunjukkan keunggulan dalam:

- a. Ekstrapolasi: Kemampuan generalisasi yang lebih baik dalam skenario pemesinan yang kompleks dan non-linear
- b. Efisiensi Data: Kemampuan untuk beradaptasi dengan cepat dengan sampel pelatihan yang minimal

- c. Interpretabilitas: Penjelasan yang lebih baik tentang hubungan antara variabel proses dan deformasi melalui panduan fisika

4.4 Integrasi Fisika sebagai Regularisasi

Integrasi informasi fisika ke dalam model deep learning berfungsi sebagai regularisasi yang efektif, meningkatkan kemampuan ekstrapolasi model dan mengurangi overfitting pada data pelatihan. Pendekatan ini memungkinkan model untuk tetap konsisten dengan prinsip-prinsip fisika yang mendasari proses pemesinan, bahkan ketika data pelatihan terbatas atau tidak lengkap.

5. KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

- a. Prediksi deformasi pemesinan multi-titik memerlukan pendekatan hybrid yang mengintegrasikan informasi fisika dan pembelajaran transfer adaptif. Model ATL-PAMDF yang mengintegrasikan Auto-MultiDeF, transfer learning, dan guidance fisika terbukti efektif mengatasi keterbatasan pendekatan konvensional.
- b. Disentanglement sinyal berbasis fisika melalui modul Auto-MultiDeF memungkinkan ekstraksi fitur yang lebih baik dari sinyal pemantauan yang kompleks, mengatasi tantangan kopling fitur dalam proses pemesinan bilah yang berdurasi panjang dan sangat terkopel.
- c. Strategi pre-training multi-channel masked joint reconstruction dengan LoRA memungkinkan adaptasi cepat dan prediksi presisi tinggi dengan sampel minimal, menjawab tantangan kelangkaan label dalam kondisi pemesinan yang bervariasi.
- d. Integrasi model mekanistik dengan kompensasi kesalahan posterior meningkatkan interpretabilitas dan keandalan prediksi, memastikan prediksi yang akurat dalam skenario pemesinan yang kompleks.

5.2 Saran

Bagi Peneliti:

- a. Melakukan validasi model ATL-PAMDF pada berbagai kondisi pemesinan dan material untuk menguji generalisasi dan ketahanan model.
- b. Mengembangkan dataset publik untuk prediksi deformasi pemesinan yang dapat digunakan untuk benchmarking dan reproduksibilitas penelitian.
- c. Mengeksplorasi integrasi model fisika yang lebih canggih untuk meningkatkan interpretabilitas dan akurasi prediksi.

Bagi Praktisi Industri:

- a. Mengadopsi pendekatan hybrid yang mengintegrasikan data sensor dengan model fisika untuk meningkatkan akurasi prediksi deformasi dalam operasi pemesinan presisi.
- b. Berinvestasi dalam sistem akuisisi data multi-sensor untuk mendukung implementasi model prediksi deformasi berbasis AI.

DAFTAR REFERENSI

- Zhou, Q., Zhang, Y., Kim, J., Imani, F., & Tang, J. (2025). Spatially-Informed Online Prediction of Milling Surface Deformation Using Multiphysics-Infused Graph Neural Network for Digital Twinning. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*.
- An, Y., et al. (2026). Multi-information guided adaptive transfer learning for multi-point deformation prediction of blades in CNC machining based on Auto-MultiDeF. *ScienceDirect*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0278612526002153>
- Li, K., et al. (2026). A tool wear prediction model integrating mechanism-data fusion with transfer learning for machine tool digital twins. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. <https://dl.acm.org/doi/abs/10.1016/j.rcim.2026.103235>
- Li, K., et al. (2026). A tool wear prediction model integrating mechanism-data fusion with transfer learning for machine tool digital twins. *ScienceDirect*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0736584526000153>
- Wang, P., Tao, H., Qi, J., & Li, P. (2024). Machining quality prediction of complex thin-walled parts using multi-task dual domain adaptive deep transfer learning. *Advanced Engineering Informatics*, 62, 102640.
- Zhang, C., Zhou, G.H., Li, J.J., et al. (2025). Surrogate-based rapid prediction of multi-point force-induced deformation in variable-helix milling of thin-walled components. *ScienceDirect*.
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1526612526006948>
- Zhang, S., Shan, Z., Yao, C., Wu, Q., & Wang, J. (2026). Machining quality prediction of aero-engine blades under data-constrained conditions using a gated attention-enhanced Kolmogorov–Arnold network..

- 2 Zhu, K.P., Huang, C.Y., Li, S., & Lin, X. (2023). Physics-informed Gaussian process for tool wear prediction. *ISA Trans*, 143, 548–556.
- 3 Fang, X., Song, Q., Wang, X., Li, Z., Ma, H., & Liu, Z. (2025). An intelligent tool wear monitoring model based on knowledge-data-driven physical-informed neural network for digital twin milling. *Mech. Syst. Signal Process.*, 232.
- 2 Sun, J., Wang, D., Liu, Z., et al. (2025). Tool digital twin based on knowledge embedding for precision CNC machine tools: wear prediction for collaborative multi-tool. *J. Manuf. Syst.*, 80, 157–175.
- 12 Qin, Y., Liu, X., Yue, C., et al. (2023). Tool wear identification and prediction method based on stack sparse self-coding network. *J. Manuf. Syst.*, 68, 72–84.
- 4 Ma, J., Luo, D., Liao, X., Zhang, Z., Huang, Y., & Lu, J. (2021). Tool wear mechanism and prediction in milling TC18 titanium alloy using deep learning. *Measurement*, 173.
- 2 17 Sun, M.J., Wang, X.D., Guo, K., et al. (2024). Tool wear monitoring based on physics-informed gaussian process regression. *J. Manuf. Syst.*, 77, 40–61.
- 2 Li, Y.L., Wang, J.J., Huang, Z.G., & Gao, R.X. (2022). Physics-informed meta learning for machining tool wear prediction. *J. Manuf. Syst.*, 62, 17–27.
- 5 Qiang, B.Y., Shi, K.N., Liu, N., Ren, J.X., & Shi, Y.Y. (2023). Integrating physics-informed recurrent gaussian process regression into instance transfer for predicting tool wear in milling process. *J. Manuf. Syst.*, 68, 42–55.
- 10 Wang, Z.X., Liu, X.L., Li, M.Y., Wang, L.H., Liang, S.Y., & Yu, F.H. (2022). Multi-point Contact Stability Prediction Considering Force-induced Deformation Effect in Milling Thin-Walled Parts. *Journal of Mechanical Engineering*, 58(17), 309.