

**СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ
И ПРИКЛАДНАЯ
ИНФОРМАТИКА**

№ 4, 2024



**SYSTEM ANALYSIS
AND APPLIED
INFORMATION SCIENCE**

No 4, 2024

**Международный
научно-технический журнал**

Издается с декабря 2012 года

Учредитель

Белорусский национальный
технический университет

Главный редактор

Дробыш Алексей Анатольевич

Редакционная коллегия

Д. В. Капский (зам. главного редактора),
А. М. Авсиевич, А. А. Большаков (РФ),
В. А. Вишняков, Л. С. Герасимович,
А. В. Гулай, Н. Н. Гурский,
Г. О. Кипиани (Грузия),
А. С. Климчик (РФ), А. А. Лобатый,
В. А. Малкин, А. В. Малолетов (РФ),
Ф. М. Нуралиев (Узбекистан),
И. А. Сатиков (ответственный секретарь),
В. В. Старовойтов, Ю. Ф. Яцына

**International
Science and Technical Journal**

Published since December, 2012

Founder

Belarusian National
Technical University

Editor-in-chief

A. Drobysch

Editorial board

D. Kapski (deputy editor-in-chief),
A. Ausiyevich, A. Bolshakov (RF),
V. Vishnyakou, L. Gerasimovich,
A. Gulaj, N. Gursky,
G. Kipiani (Georgia),
A. Klimchik (RF), A. Lobaty,
V. Malkin, A. Maloletov (RF),
F. Nuraliev (Uzbekistan),
I. Satikov (executive secretary),
V. Starovoitov, U. Yatsyna

Журнал включен в "Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований"

Журнал включен в международные каталоги и базы данных:

- | | |
|--|---------------|
| ❖ Российский индекс научного цитирования (РИНЦ) | ❖ EBSCO |
| ❖ Научная электронная библиотека eLIBRARY.RU | ❖ BASE Search |
| ❖ Электронно-библиотечная система (ЭБС) издательства Лань | ❖ OpenAIRE |
| ❖ DOAJ https://doaj.org/toc/2414-0481 | ❖ WorldCat |
| ❖ Google Scholar | ❖ OpenDOAR |
| ❖ Киберленинка | ❖ ROAR |

Ведущий научный редактор

И. А. Сатиков

Технический редактор

О. Л. Чабарова

Адрес редакции

пр. Независимости, 65, Минск, 220013,
Республика Беларусь
Тел. +375 17 266-26-58
e-mail: ca_pi@bntu.by

Executive secretary of the editorial board

I. Satikov

Technical Editor

V. Chabarava

Editorial board address

Nezavisimosty Ave., 65, Minsk, 220013,
Republic of Belarus
Tel. +375 17 266-26-58
e-mail: ca_pi@bntu.by

Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации
№ 1540 от 08.06.2012, выданное Министерством информации Республики Беларусь

Подписано в печать 16.12.2024. Формат бумаги 60x84 1/8. Бумага мелованная.

Цифровая печать. Усл. печ. л. 7,56. Уч.-изд. л. 5,1. Тираж 25 экз. Заказ 815.

Отпечатано в БНТУ. ЛП № 38200000006896 от 03.03.2014.

220013, г. Минск, пр. Независимости, 65.

СОДЕРЖАНИЕ

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

Prihozhy A.A., Karasik O.N.

Competing all-pairs shortest paths algorithms for sparse / dense graphs: implementation and comparison.....4

Rulko E.V.

Complexification through gradual involvement and reward Providing in deep reinforcement learning.....13

Напрасников В.В., Бородуля А.В., Полозков Ю.В., Кункевич Д.П., Ван Цзы Жуй

Модальный анализ пластинчатых ячеистых объектов периодической структуры.....21

УПРАВЛЕНИЕ ТЕХНИЧЕСКИМИ ОБЪЕКТАМИ

Сидоренко А.В., Солодухо Н.А.

Алгоритм огибания препятствий при перемещении мобильного робота.....29

Ortiqov Z.U.

Problems of the process of moistening raw cotton and cotton fiber. Cotton fiber wetting process problems.....34

Albagoush A.A., Kupriyanov A.B.

Assessment of solar panel contamination via its image in Libya climate.....41

Павлюковец С.А., Вельченко А.А., Радкевич А.А.

Поведение мобильного робота с симметричной структурой колес механум при перемещении по криволинейной траектории.....47

ОБРАБОТКА ИНФОРМАЦИИ И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ

Голуб Ю.И.

Безэталонная оценка качества цифрового изображения статической подписи.....54

CONTENTS

SYSTEM ANALYSIS

Prihozhy A.A., Karasik O.N.

Competing all-pairs shortest paths algorithms for sparse / dense graphs: implementation and comparison.....4

Rulko E.V.

Complexification through gradual involvement and reward Providing in deep reinforcement learning.....13

Naprasnikov V.V., Borodulya A.V., Polozkov J.V., Kunkevich D.P., Wan Tzu Zhui

Modal analysis of plate-like cellular objects with periodic structure.....21

MANAGMENT OF TECHNICAL OBJECTS

Sidorenko A.V., Saladukha N.A.

Obstacle avoidance algorithm in mobile robot motion.....29

Ortiqov Z.U.

Problems of the process of moistening raw cotton and cotton fiber. Cotton fiber wetting process problems.....34

Albagoush A.A., Kupriyanov A.B.

Assessment of solar panel contamination via its image in Libya climate.....41

Pauliukavets S.A., Velchenko A.A., Radkevich A.A.

Behavior of a mobile robot with symmetrical structure of mecanum wheels when movement along a curvilinear trajectory.....47

DATA PROCESSING AND DESICION-MAKING

Golub Y.I.

No-reference digital image quality assessment of offline signature.....54

СИСТЕМНЫЙ АНАЛИЗ

SYSTEM ANALYSIS

PRIHOZHYY A.A., KARASIK O.N.

COMPETING ALL-PAIRS SHORTEST PATHS ALGORITHMS FOR SPARSE / DENSE GRAPHS: IMPLEMENTATION AND COMPARISON

Belarussian National Technical University, Minsk, Republic of Belarus

In this paper we consider two families of competing algorithms for finding the shortest paths between all pairs of vertices (APSP) in directed weighted large graphs with different edge densities: Dijkstra and Floyd-Warshall. For comparison, we have taken Dijkstra's algorithm with dynamically varying binary heap, which solves the APSP problem purely in parallel by repeatedly executing on all vertices of the graph considered as source vertices, and we have taken blocked Floyd-Warshall algorithm, which is also well-parallelizable. It is known that in terms of computational complexity, the first algorithm is preferable on sparse graphs and the second algorithm is preferable on dense graphs. At the same time, it is not clear what are the ranges of graph densities at which the first algorithm will consume less CPU time than the second algorithm. This paper describes multithreaded implementations of parallel algorithms on multicore processors that make different usage of synchronization primitives such as mutex, conditional variable, lock-ing, and atomic operation. By conducting computational experiments on an 8-core Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU @ 2.90GHz, we found that each algorithm has a preferred graph density. In the case of multi-threaded parallel implementation, the blocked Floyd-Warshall algorithm has lower running time than Dijkstra's algorithm if the graph density is greater than 0.5. Otherwise, Dijkstra's algorithm runs faster. In the case of single-threaded implementation, the split point is 0.43.

Keywords: Sparse graph, dense graph, APSP problem, Dijkstra-family algorithms, Floyd-Warshall family algorithms, multi-core processor, multi-threaded implementation, comparison

Introduction

Models, methods, algorithms, and tools for finding shortest paths between vertices of large, weighted directed and undirected sparse and dense graphs [1] help to solve many problems in many application areas. In this paper, we consider directed simple graphs $G = (V, E)$ where V is a set of vertices and E is a set of edges with positive weights. A graph can have a different number of edges and can range from sparse to dense.

For the single-source shortest paths problem (SSSP), Dijkstra's algorithm [2] with the min-priority queue has the worst-time complexity of $O((|V| + |E|) \cdot \log |V|)$ if the queue is implemented using a binary heap (BH). A whole family of algorithms has been developed based on Dijkstra's algorithm [3–5]. Thus, Dijkstra's algorithm implemented using a Fibonacci heap (FH) has a running time of $O(|V| \cdot \log |V| + |E|)$. The algorithm is most suitable for sparse graphs.

The Floyd-Warshall (FW) algorithm [6] for the all-pairs shortest paths problem (APSP) has a time complexity of $O(|V|^3)$ regardless of the number of edges of the graph. The blocked Floyd-Warshall (BFW) algorithm [7–20] is a generalization of the first algorithm with increasing performance. The algorithm is most suitable for dense graphs. APSP can also be solved by performing N runs of Dijkstra's algorithm for vertices V considered as source vertices. For directed simple graphs, the graph density is defined as:

$$Y = |E| / |V| \cdot (|V| - 1).$$

Then the Dijkstra running time in the case of the APSP problem depending on the graph density is:

1) for a binary heap

$$O(|V| \cdot (|V| + Y \cdot |V| \cdot (|V| - 1)) \cdot \log |V|);$$

2) for a Fibonacci heap

$$O(|V| \cdot (|V| \cdot \log |V| + Y \cdot |V| \cdot (|V| - 1))).$$

Thus, the speedup of Dijkstra's algorithm compared to the Floyd-Warshall algorithm is:

1) for a binary heap

$$Speedup(BH) = |V| / ((1 + Y \cdot (|V| - 1)) \cdot \log |V|);$$

2) for a Fibonacci heap

$$Speedup(FH) = |V| / ((\log |V| + Y \cdot (|V| - 1))).$$

Figure 1 shows the dependence of $Speedup(BH)$ on the density of graphs consisting of 2400 vertices. Dijkstra's algorithm is faster than the Floyd-Warshall algorithm in the graph density interval $[0.0, 0.128118]$. The Floyd-Warshall algorithm is faster in interval $(0.128118, 1.0]$. Dijkstra's algorithm with the Fibonacci heap is faster than the Floyd-Warshall algorithm in the much wider interval $[0.0, 0.99716]$. If we move from algorithms to their realization on multicore processors, the division point 0.128118 can be moved in the interval $[0, 1]$.

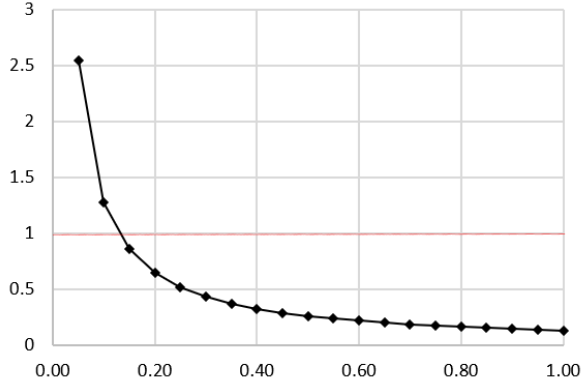


Figure 1. Speedup (in times) of Dijkstra's APSP algorithm compared to the Floyd-Warshall algorithm as a function of graph density Y when graph size $|V| = 2400$

It has been observed in the literature that the binary heap in Dijkstra's algorithm can be implemented more efficiently compared to the Fibonacci heap. Therefore, in the paper, we consider and compare different sequential and parallel implementations of the Floyd-Warshall and Dijkstra (with a dynamically varying binary heap) algorithms on large graphs of different densities.

Two parallel implementations of Dijkstra's APSP algorithm with dynamic binary heap

Let $N = |V|$ and W be the adjacency matrix for a graph G : $w(i, i) = 0$ for $1 \leq i \leq N$; $w(i, j)$ is the weight of edge $(i, j) \in E$; $w(i, j) = \infty$ for $(i, j) \notin E$ and $i \neq j$. Let D be the distance matrix between all pairs of vertices $i, j \in V$, $i \neq j$ and d_{ij} be the length of the shortest path from vertex i to vertex j . Let P be a matrix whose element p_{ij} is the vertex preceding vertex j in the path to be shortest from i to j . The task of the APSP algorithm is to compute all elements of matrices D and P given by the graph G .

Dijkstra's SSSP algorithm can be easily extended to the APSP algorithm by repeatedly applying it to rows i of matrices D and P . All rows can be computed in parallel. Figure 2 shows the architecture of our version Dv.1 of the Dijkstra APSP parallel algorithm implementation. The set of rows of matrix D and the set of rows of matrix P are partitioned into corresponding slots 1 ... T of rows, which are computed by separate threads. Each thread uses its own *Dist* and *Prev* vectors and its own dynamic , therefore it can operate completely independently of other threads. There is no need to use synchronization facilities. If the running time of Dijkstra's algorithm for one source vertex is close to the running time for another source vertex, the computational load is almost the same for all threads.

Algorithm 1 describes the behavior of the multithreaded parallel Dijkstra APSP algorithm. It creates a thread that executes a function *Dijkstra_APSP* to compute the shortest paths from each source vertex of the corresponding slot. Algorithm 2 implements this

function. Its inputs are the thread number t , the number N of vertices, and the adjacency list AL , which is the set of graph edges (and their weights) outgoing from each vertex. Its outputs are matrices D and P , whose row slots are updated by thread t . A *Slot* defines the range from the *first* to the *last* row of matrices D and P that are assigned to a thread. The function *Dijkstra_SSSP* computes the vectors *Dist* and *Prev*, which are assigned to the corresponding rows of D and P .

Algorithm 3 describes the Dijkstra SSSP algorithm, which uses the AL graph adjacency list and works with a min-priority queue *QueueB*, arrays *Dist* and *Prev*. We represent the queue as a labeled dynamically changing binary tree heap. Initially, the tree consists of $2N - 1$ nodes (N terminal and $N - 1$ nonterminal) and has $\lceil \log n \rceil$ depth.

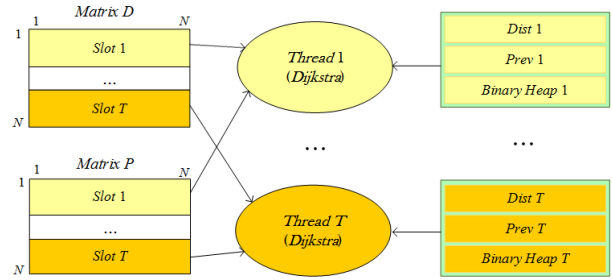


Figure 2. Version Dv.1 of parallel multithreaded implementation of Dijkstra APSP algorithm with dynamic binary heap

Algorithm 1: Multithreaded parallel Dijkstra APSP algorithm (version Dv.1)

Input: A number N of graph vertices
Input: A number T of threads
Input: A graph adjacent list AL
Output: A matrix $D[N \times N]$ of shortest path distances
Output: A matrix $P[N \times N]$ of previous vertices in shortest paths

```

for  $t \leftarrow 1$  to  $T$  do
    Create_Thread( $t$ ) with function
        Dijkstra_APSP( $t, N, AL, D, P$ )
for  $t \leftarrow 1$  to  $T$  do
    Join_Thread( $t$ )
return  $B, P$ 

```

Algorithm 2: *Dijkstra_APSP*

Input: A number t of thread
Input: A number N of graph vertices
Input: An adjacent list AL of graph
Output: A matrix D of shortest path distances
Output: A matrix P of previous vertices in shortest paths

```

QueueB  $\leftarrow$  Create_Binary_Queue( $N, AL$ )
Dist  $\leftarrow$  Create_Initialize_Dist( $N$ )

```

```

Prev ← Create_Initialize_Prev(N)
Slot ← Choose_Slot(N, t)
for row ← Slot.first to Slot.last do
    Dijkstra_SSSP(N, AL, row, QueueB, Dist, Prev)
    D(row) ← Dist
    P(row) ← Prev
return B, P

```

Each node has two labels: vertex identifier v and key $Dist[v]$. The root of the tree points to the vertex with the smallest key. *QueueB* supports two operations:

1. *Extract-min* removes the *NearestV* element with the smallest key from *QueueB*; this removes one terminal and one non-terminal vertex from the tree.

2. *Decrease-key* replaces the current key $Dist[AdjV.id]$ of adjacent vertex *AdjV.id* with the *NewDist* key, and then reorders *QueueB* by changing the labels of the vertices in the tree.

Algorithm 3: *Dijkstra_SSSP*

Input: A number N of graph vertices

Input: An adjacent list *AL* of graph

Input: A row of matrix *D* and matrix *P*

Output: A vector *Dist* of shortest path distances

Output: A vector *Prev* of previous vertices in paths

```

for i ← 1 to N do
    Dist[v] ← ∞
    Prev[v] ← undefined
Dist[row] ← 0
Prev[row] ← row
QueueB ← Initialize_Queue(N, row)
for Step ← 1 to N do
    NearestV ← QueueB.root.id
    Distance ← Dist[NearestV]
    if Distance = ∞ then break
    for AdjV ← AL[NearestV].list do
        NewDist ← Distance + AdjV.key
        if Dist[AdjV.id] > NewDist then
            Dist[AdjV.id] ← NewDist
            Prev[AdjV.id] ← NearestV
            Decrease_Key (QueueB, AdjV.id, NewDist)
            Extract_Min (QueueB, NearestV)
return Dist, Prev

```

As the binary tree becomes smaller step by step, the average time complexity of *Extract-min* and *Decrease-key* operations is less than $\log |V|$. This is the source of speeding up of Algorithm 3.

Figure 3 shows the Dv.2 version of our implementation of the parallel Dijkstra APSP algorithm. Each thread captures matching rows of matrices *D* and *P* concurrently and calls *Dijkstra_SSSP*. After computing the shortest paths for the source, the thread captures the next rows. Since the pool is shared by all threads, our implementation uses atomic operations to select rows from the pool.

Parallel BFW and its implementation with threads, block pools and atomic operations

BFW performs graph partitioning into sub-graphs with S vertices and creates blocked matrices $B[M \times M]$ of distances of shortest paths and $P[M \times M]$ of previous vertices on shortest paths, where $M = N/S$. In the outer loop along m , three types of blocks are computed sequentially: diagonal, cross and peripheral. The cross blocks are collected in a *PoolC* of size $2 \cdot (M - 1)$ and are computed mutually in parallel by the *Perform_Parallel_Pool* function. Peripheral blocks are collected in *PoolP* of size $(M - 1)^2$ and are computed in parallel by the same function.

The architecture of the multithreaded implementation of the Dv.1 version of the algorithm is shown in Figure 3. The main thread computes the diagonal blocks using the *FW* or *GEA* algorithm [15]. Threads 1 to T compute cross and peripheral blocks from *PoolC* and *PoolP*. The architecture has a drawback as the *Perform_Parallel_Pool* function (Algorithm 5) creates and deletes all pools and threads $2 \cdot M$ times. Its advantage is no need for synchronization between Algorithms 4 and 5.

Algorithm 4: Parallel BFW with pools and atomic operations

Input: A number N of input graph vertices

Input: A matrix $W[N \times N]$ of graph edge weights

Input: A number M of blocks

Input: A size S of block

Output: A blocked matrix $B[M \times M]$ of path distances

Output: A blocked matrix $P[M \times M]$ of previous vertices

```

B[M×M] ← W[N×N]
Initialize_Prev (P[M×M])
for m ← 1 to M do
    Calculate_Block (S, B, P, m, m, m)
    Initialize_Pool_C (Pool_C_of_Blocks)
    for v ∈ {1...M} and v ≠ m do
        Add_to_Pool_C (v, m, m)
        Add_to_Pool_C (m, m, v)
    Perform_Parallel_Pool (PoolC_of_Blocks, S, B, P)
    Initialize_Pool_P (Pool_P_of_Blocks)
    for v ∈ {1...M} and v ≠ m do
        for u ∈ {1...M} and u ≠ m do
            Add_to_Pool_P (v, m, u)
        Perform_Parallel_Pool (PoolP_of_Blocks, S, B, P)
return B, P

```

Algorithm 5: *Perform_Parallel_Pool*

Input: A *Pool_of_Blocks* to be computed

Input: A size S of block

Inout: A blocked matrix *B* of path distances

Inout: A blocked matrix *P* of previous vertices

```

for t ← 1 to T do
    Create_Thread(t) with function
        Compute_Blocks (Pool_of_Blocks, t, S, B, P)
for t ← 1 to T do
    Join_Thread(t)

```

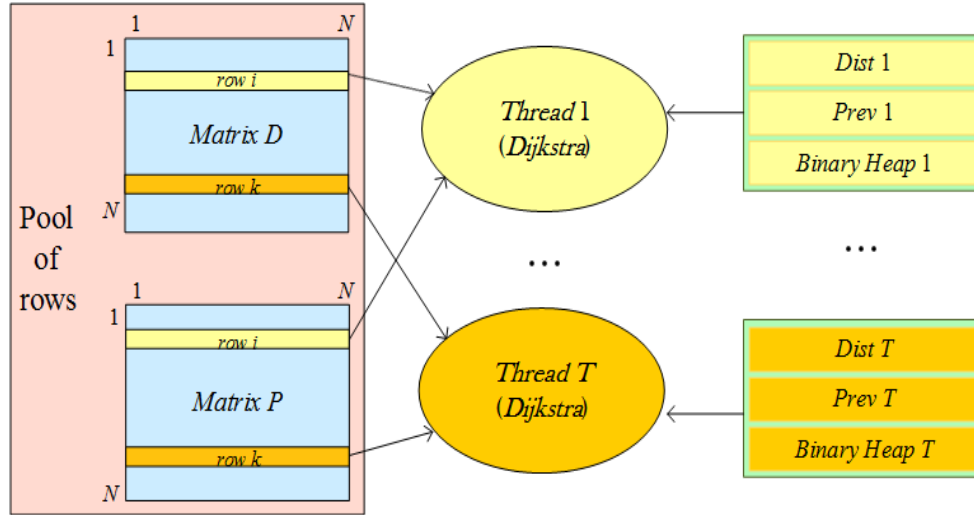


Figure 3. Version Dv.2 of parallel multi-threaded implementation of the Dijkstra APSP algorithm with a pool of rows

The *Compute_Blocks* function (Algorithm 6) is run by threads 1 to T . Each function call iteratively grabs a unique record from the same pool and uses it to recalculate one block. All records that are in the pool can be processed in parallel. The capture of records is accomplished using atomic operations. Different threads can process different number of records.

Algorithm 6: *Compute_Blocks* implemented by each thread

Input: A *Pool_of_Blocks* to be computed
Input: A thread number t
Input: A size S of block
InOut: A matrix B updated for blocks of pool
InOut: A matrix P updated for blocks of pool
while (*true*) **do**
 $rec \leftarrow \text{Atomic_Next_record_Capture}(\text{Pool_of_Blocks})$
 if $rec \neq \text{empty}$ **then**
 $\text{Calculate_Block}(S, rec.v, rec.m, rec.u, B, P)$
 else break

The *Compute_Blocks* function (Algorithm 7) has six inputs: the block size S , the three indices v , m and u of the vertex subsets, the matrices B and P . It recalculates the block $B_{v,u}$ through the blocks $B_{v,m}$ and $B_{m,u}$, of which two or three may be the same.

Algorithm 7: Block calculation (*Calculate_Block*)

Input: A size S of block
Input: Indices v , m and u of vertex subsets
InOut: A blocked matrix B of path distances
InOut: A blocked matrix P of previous vertices
for $k \leftarrow 1$ **to** S **do**
 for $i \leftarrow 1$ **to** S **do**
 for $j \leftarrow 1$ **to** S **do**
 $sum \leftarrow B_{v,m}(i, k) + B_{m,u}(k, j)$
 if $B_{v,u}(i, j) > sum$ **then**
 $B_{v,u}(i, j) \leftarrow sum$
 $P_{v,u}(i, j) \leftarrow P_{m,u}(k, j)$

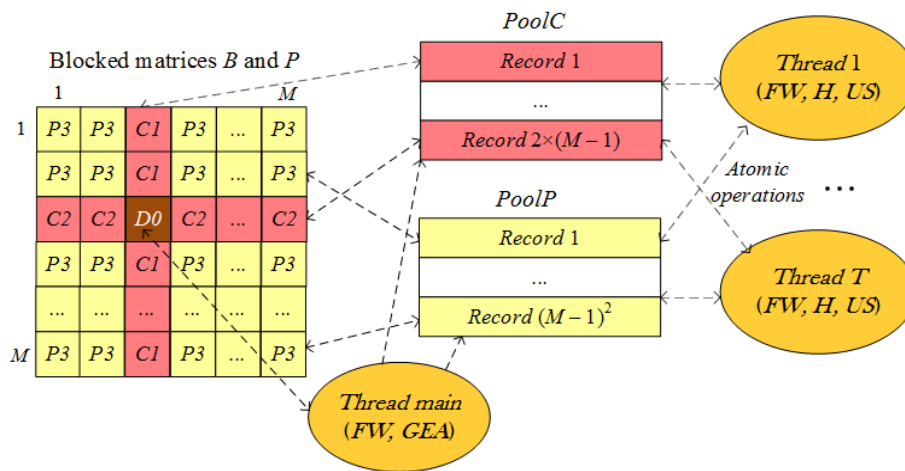


Figure 4. FWv.1 version of parallel multi-threaded implementation of BFW algorithm with pools *PoolC* and *PoolP*; *FW* stands for Floyd-Warshall, *H* stands heterogeneous, *US* – unequal sizes and *GEA* stands for graph extension algorithm

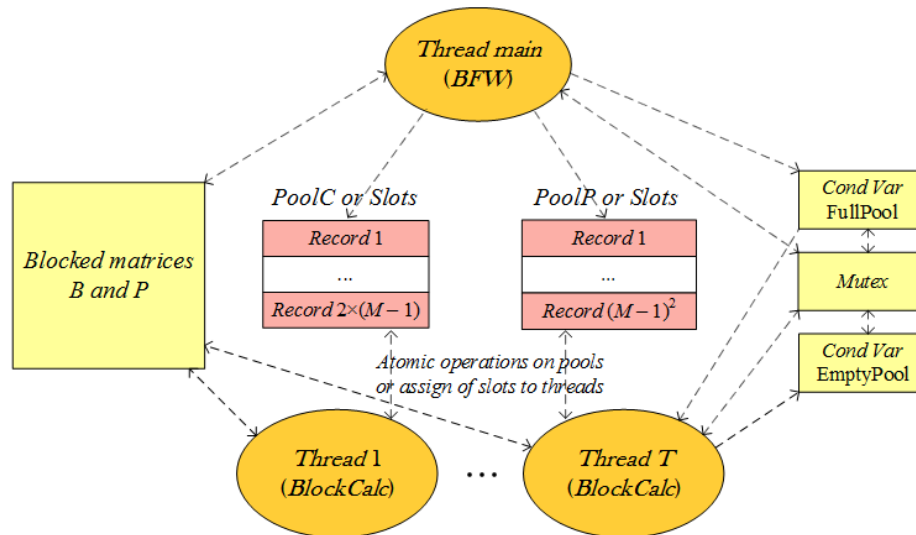


Figure 5. Version FWv.2 and FWv.3 of parallel multi-threaded implementation of *BFW* algorithm with pools, mutexes and conditional variables

Two implementations of parallel BFW using threads, mutexes and conditional variables

To avoid multiple creation and deletion of worker threads in the loop across m (Algorithm 4), we have developed FWv.2 and FWv.3 versions of parallel implementations of *BFW* (Figure 5). They use a mutex and conditional variables *FullPool* and *EmptyPool* to synchronize the main thread executing Algorithm 4 and worker threads 1 to T executing Algorithm 7 to safely recalculate all blocks described in the pool. The mutex protects the pool from destruction. The versions differ from each other in the way the threads access entries in the pool. The FWv.2 version pre-divides the pool record set into slots, one slot for one thread. No conflict occurs when two and more threads capture the same record. In the FWv.3 version, each thread has access to all records in the pool and uses atomic operations to dynamically capture the next record for processing. The FWv.2 version is preferred when each block is computed at approximately the same time and the running time of each thread is predictable in advance. The FWv.1 and FWv.3 versions may be faster if blocks of different types are computed by different heterogeneous algorithms requiring different CPU times, or if blocks are of unequal size and require different computation times.

Results

Experimental results are obtained on an Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU @ 2.90GHz 8-core 16 physical thread processor using C++ language and the Visual Studio 2019 Community Edition compiler (MSVC++ 14.29). Table 1 shows that version Dv.1 of Dijkstra's multi-threaded implementation of APSP is on average 3.2 % faster than version Dv.2, although it loses to Dv.2 on graphs of certain sizes with density 0.2. For graphs of density 0.8, Dv.2 is on average 2.85 % faster than Dv.1.

Table 1. Comparison of running times (%) on different graph sizes of two versions of multi-threaded implementations of Dijkstra's APSP algorithm for graph densities of 0.2 and 0.8

Graph size	Density 0.2	Density 0.8
1200	-2.86	1.85
2400	1.25	-0.61
3600	-0.24	3.73
4800	-0.41	5.54
6000	7.84	4.63
7200	10.27	2.78
8400	6.58	2.05

Table 2 compares the runtimes of three multi-threaded implementations of the blocked Floyd-Warshall algorithm on graphs of sizes 1200–8400. For graphs of density 0.8, the FWv.1 version wins on average 4.52 % over FWv.2 and 4.64 % over FWv.3. The FWv.2 version wins 0.26 % over FWv.3.

Table 2. Comparison (%) of running times of three versions of BFW implementations for graph density 0.8

Graph size	v.1 / v.2	v.1 / v.3	v.2 / v.3
1200	-1.94	-1.94	0.00
2400	1.90	0.32	1.59
3600	8.81	15.01	-7.30
4800	14.36	10.94	3.85
6000	-0.53	-1.12	0.58

Figure 6 compares single-thread implementations of sequential *FW*, *BFW* and Dijkstra APSP on graphs of different densities. As can be seen, *BFW* is about 1.83 times faster than *FW* on all graphs. Dijkstra is 6.07 times faster than *FW* at *density* = 0.1 and is 1.1 times slower at *density* = 1. Dijkstra is 3.67 times

faster than *BFW* at *density* = 0.1 and twice as slow at *density* = 1. If *density* $\leq$ 0.43, Dijkstra beats *BFW*, otherwise it loses.

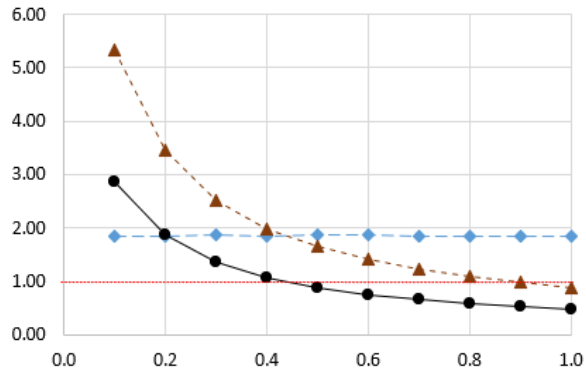


Figure 6. Comparison of three single-threaded APSP algorithms on graphs with 2400 vertices and block-size 120 as a function of graph density: long dashed line – reduction of runtime (in times) of *BFW* compared to *FW*, dashed line – Dijkstra compared to *FW*, and solid line – Dijkstra compared to *BFW*

Figure 7 shows a comparison of two parallel multi-threaded implementations of the APSP algorithms with each other and with their single-thread implementations at graph densities from 0.1 to 1. It is shown that parallel APSP Dijkstra is up to 3.98 times faster than parallel *BFW* when the graph *density* $\leq$ 0.5. Parallel *BFW* is twice as fast as parallel Dijkstra if the *density* $>$ 0.5.

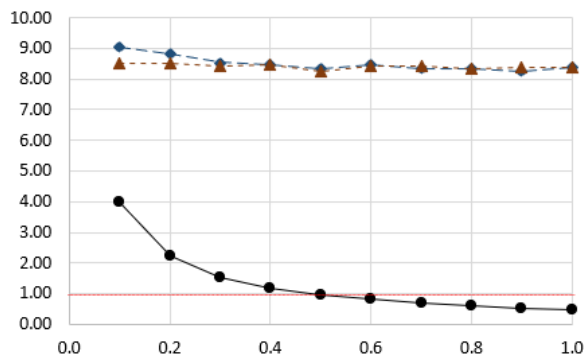


Figure 7. Comparison of two parallel 16-threaded implementations of APSP algorithms with each other and with their sequential counterparts on graphs of 2400 vertices and block-size 120 as a function of graph density: solid line – runtime reduction (in times) of parallel Dijkstra compared to parallel *BFW*, long dashed line – of parallel Dijkstra compared to sequential Dijkstra, and dashed line – of parallel *BFW* compared to sequential *BFW*

Parallel Dijkstra is faster than sequential Dijkstra by an average 8.5 times. Parallel *BFW* is 8.41 times faster than sequential *BFW*. The division point of the interval $[0, 1]$ has moved to the centre. We attribute this with three main reasons:

1) the average case rather than the worst case is evaluated; 2) the effect of a multi-core processor with hierarchical memory; and 3) the properties of a dynamically modified heap. Table 3 shows that the number the decrease-key calls is bounded and the number of levels of binary heap the key moves over remains between 1.59 and 1.71 when the graph density is in $[0.1, 1.0]$.

Table 3. Parameters of Decrease-Key in dynamic binary heap for graphs of 2400 vertices with different edge densities

Edges %	Edge count	DK calls	Edges per one call	Levels per call
0.1	578122	10243	56	1.71
0.2	1152695	10828	106	1.68
0.3	1728197	11071	156	1.67
0.4	2305101	11206	205	1.66
0.5	2879364	11245	256	1.65
0.6	3455521	11366	304	1.64
0.7	4031390	11491	350	1.62
0.8	4606640	11561	398	1.61
0.9	5182374	11561	448	1.60
1.0	5757600	11511	500	1.59

Figure 8 shows that the parallel Dijkstra algorithm is faster than the parallel *BFW* algorithm by a factor of 2.23 to 2.67 on sparse graphs of 1200–8400 vertices with density 0.2.

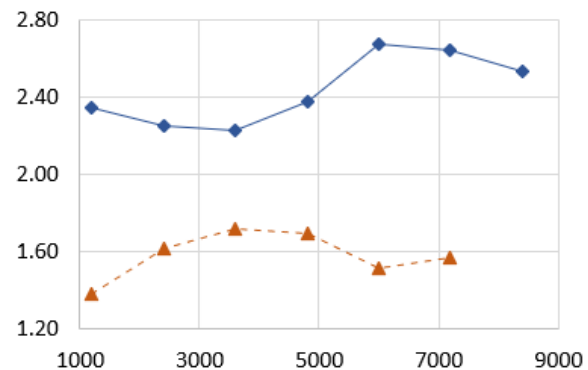


Figure 8. Comparison of parallel APSP Dijkstra and *BFW* on graph of different sizes: solid line – reduction of runtime (in times) of Dijkstra compared to *BFW* at *density* = 0.2; dashed line – reduction of runtime of *BFW* compared to Dijkstra at *density* = 0.8

At the same time, Figure 8 shows that the parallel *BFW* algorithm is faster than Dijkstra's parallel algorithm by a factor of 1.39 to 1.72 on dense graphs of 1200–7200 vertices with density 0.8. Dijkstra's gain over *BFW* decreases as the graph size increases from 1200 to 3600. Then the gain increases up to a graph size of 6000. For larger graphs, the gain decreases.

Conclusion

The paper has shown that the computational complexity of all-pairs shortest paths algorithms can be evaluated theoretically approximated. When the algorithms are implemented with parallel multithreaded applications for multi-core processors, the regions of preference of the algorithms differs from those theoretically predicted. We have developed two parallel

multi-thread implementations of parallel Dijkstra APSP algorithm with dynamic binary heap and three parallel multi-thread implementations of blocked Floyd-Warshall algorithm and experimentally have shown on Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU @ 2.90GHz 8-core processor that Dijkstra's APSP is faster than the blocked Floyd-Warshall on sparse graphs with $density \leq 0.5$. On graphs with $density > 0.5$, the blocked Floyd-Warshall is faster than Dijkstra's APSP.

REFERENCES

1. Madkour A., Aref W.G., Rehman F.U., Rahman M.A., Basalamah S. A Survey of Shortest-Path Algorithms. ArXiv: 1705.02044v1 [cs.DS], 4 May 2017, 26 p.
2. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik, 1959, vol. 1, no. 1, pp. 269-271.
3. Bellman R.E. On a routing problem. Quarterly of Applied Mathematics, 1958, vol. 16, no. 1, pp. 87-90.
4. Johnson D.B. Efficient Algorithms for Shortest Paths in Sparse Networks. J. ACM, 1977, vol. 24 no. 1, pp. 1-13.
5. Harish P., Narayanan P.J. Accelerating large graph algorithms on the GPU using CUDA. International conference on high-performance computing. Springer, 2007, pp. 197-208.
6. Floyd R.W. Algorithm 97: Shortest path. Communications of the ACM, 1962, no. 5 (6), p. 345.
7. Katz G.J., Kider J.T. All-pairs shortest paths for large graphs on the GPU. GH'08: Proceedings of the 23rd ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS symposium on Graphics hardware. ACM, 2008, pp. 47-55.
8. Djidjev H., Thulasidasan S., Chapuis G., Andonov R. and Lavenier D. Efficient multi-GPU computation of all-pairs shortest paths. IEEE 28th International Parallel and Distributed Processing Symposium. IEEE, 2014, pp. 360-369.
9. Venkataraman G., Sahni S., Mukhopadhyaya S. A Blocked All-Pairs Shortest Paths Algorithm. Journal of Experimental Algorithmics (JEA), 2003, vol. 8, pp. 857-874.
10. Park J.S., Penner M., and Prasanna V.K. Optimizing graph algorithms for improved cache performance. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2004, no. 15 (9), pp. 769-782.
11. Yang S., Liu X., Wang Y., He X., Tan G. Fast All-Pairs Shortest Paths Algorithm in Large Sparse Graph. ICS '23: Proceedings of the 37th International Conference on Supercomputing, 2023, pp. 277-288.
12. Prihozhy A.A., Karasik O.N. Advanced heterogeneous block-parallel all-pairs shortest path algorithm. Proceedings of BSTU, issue 3, Physics and Mathematics. Informatics, 2023, no. 1 (266), pp. 77-83.
13. Prihozhy A.A., Karasik O.N. New blocked all-pairs shortest paths algorithms operating on blocks of unequal sizes. System analysis and applied information science, 2023, no. 4, pp. 4-13.
14. Karasik O.N., Prihozhy A.A. Blocked algorithm of finding all-pairs shortest paths in graphs divided into weakly connected clusters. System analysis and applied information science, 2024, no. 2, pp. 4-10.
15. Prihozhy A.A., Karasik O.N. Inference of shortest path algorithms with spatial and temporal locality for big data processing. Big Data and Advanced Analytics: proceedings of VIII international conference. Minsk, Bestprint Publ., 2022, pp. 56-66.
16. Karasik O.N., Prihozhy A.A. Tuning block-parallel all-pairs shortest path algorithm for efficient multi-core implementation. System analysis and applied information science, 2022, no. 3, pp. 57-65.
17. Prihozhy A.A. Generation of shortest path search dataflow networks of actors for parallel multicore implementation. Informatics, 2023, vol. 20, no. 2, pp. 65-84.
18. Prihozhy A.A. Optimization of data allocation in hierarchical memory for blocked shortest paths algorithms. System analysis and applied information science, 2021, no. 3, pp. 40-50.
19. Prihozhy A.A. Simulation of direct mapped, k-way and fully associative cache on all-pairs shortest paths algorithms. System analysis and applied information science, 2019, no. 4, pp. 10-18.
20. Prihozhy A.A., Karasik O.N. Influence of shortest path algorithms on energy consumption of multi-core processors. System analysis and applied information science, 2023, no. 2, pp. 4-12.

ЛИТЕРАТУРА

1. Madkour A., Aref W.G., Rehman F.U., Rahman M.A., Basalamah S. A Survey of Shortest-Path Algorithms. ArXiv: 1705.02044v1 [cs.DS], 4 May 2017, 26 p.
2. Dijkstra E.W. A note on two problems in connexion with graphs. Numerische Mathematik, 1959, vol. 1, no. 1, pp. 269-271.
3. Bellman R.E. On a routing problem. Quarterly of Applied Mathematics, 1958, vol. 16, no. 1, pp. 87-90.
4. Johnson D.B. Efficient Algorithms for Shortest Paths in Sparse Networks. J. ACM, 1977, vol. 24, no. 1, pp. 1-13.

5. Harish P., Narayanan P.J. Accelerating large graph algorithms on the GPU using CUDA. International conference on high-performance computing. Springer, 2007, pp. 197-208.
6. Floyd R.W. Algorithm 97: Shortest path. Communications of the ACM, 1962, no. 5 (6), p. 345.
7. Katz G.J., Kider J.T. All-pairs shortest paths for large graphs on the GPU. GH'08: Proceedings of the 23rd ACM SIGGRAPH/EUROGRAPHICS symposium on Graphics hardware. ACM, 2008, pp. 47-55.
8. Djidjev H., Thulasidasan S., Chapuis G., Andonov R. and Lavenier D. Efficient multi-GPU computation of all-pairs shortest paths. IEEE 28th International Parallel and Distributed Processing Symposium. IEEE, 2014, pp. 360-369.
9. Venkataraman G., Sahni S., Mukhopadhyaya S. A Blocked All-Pairs Shortest Paths Algorithm. Journal of Experimental Algorithmics (JEA), 2003, vol. 8, pp. 857-874.
10. Park J.S., Penner M., and Prasanna V.K. Optimizing graph algorithms for improved cache performance. IEEE Trans. on Parallel and Distributed Systems, 2004, no. 15 (9), pp. 769-782.
11. Yang S., Liu X., Wang Y., He X., Tan G. Fast All-Pairs Shortest Paths Algorithm in Large Sparse Graph. ICS '23: Proceedings of the 37th International Conference on Supercomputing, 2023, pp. 277-288.
12. Прихожий А.А., Карасик О.Н. Усовершенствованный разнородный блочно-параллельный алгоритм поиска кратчайших путей на графе. Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика, 2023, № 1 (266), с. 77-83.
13. Прихожий А.А., Карасик О.Н. Новые блочные алгоритмы поиска кратчайших путей между всеми парами вершин графа, работающие на блоках неравных размеров. Системный анализ и прикладная информатика. 2023, № 4, с. 4-13.
14. Карасик О.Н., Прихожий А.А. Блочный алгоритм поиска кратчайших путей между всеми парами вершин в графах со слабосвязанными кластерами. Системный анализ и прикладная информатика. 2024, № 2, с. 4-10.
15. Prihozhyy A.A., Karasik O.N. Inference of shortest path algorithms with spatial and temporal locality for big data processing. Big Data and Advanced Analytics: сборник научных статей VIII Международной научно-практической конференции, Минск, 11-12 мая 2022 года. Минск, БГУИР, 2022, с. 56-66.
16. Карасик О.Н., Прихожий А.А. Настройка блочно-параллельного алгоритма поиска кратких путей на эффективную многоядерную реализацию. Системный анализ и прикладная информатика. 2022, № 3, с. 57-65.
17. Прихожий А.А. Генерация потоковых сетей акторов поиска кратчайших путей для параллельной многоядерной реализации. Информатика, 2023, № 2, с. 65-84.
18. Прихожий А.А. Оптимизация размещения данных в иерархической памяти для блочных алгоритмов поиска кратчайших путей. Системный анализ и прикладная информатика, 2021, no. 3, с. 40-50.
19. Прихожий А.А. Моделирование кэш прямого отображения и ассоциативных кэш на алгоритмах поиска кратчайших путей на графе. Системный анализ и прикладная информатика, 2019, no. 4, с. 10-18.
20. Прихожий А.А., Карасик О.Н. Влияние алгоритмов поиска кратчайших путей на энергопотребление многоядерных процессоров. Системный анализ и прикладная информатика, 2023, № 2, с. 4-12.

ПРИХОЖИЙ А.А., КАРАСИК О.Н.

КОНКУРИРУЮЩИЕ АЛГОРИТМЫ ПОИСКА КРАТЧАЙШИХ ПУТЕЙ МЕЖДУ ВСЕМИ ПАРАМИ ВЕРШИН РАЗРЕЖЕННЫХ / ПЛОТНЫХ ГРАФОВ: РЕАЛИЗАЦИЯ И СРАВНЕНИЕ

Белорусский национальный технический университет, Минск, Республика Беларусь

В статье рассматриваются два семейства конкурирующих алгоритмов поиска кратчайших путей между всеми парами вершин (APSP) в ориентированных взвешенных больших графах с различной плотностью ребер: Дейкстры и Флойда-Уоршелла. Для сравнения мы взяли алгоритм Дейкстры с динамически изменяемой двоичной кучей, который решает задачу APSP чисто параллельно путем многократного выполнения на всех вершинах графа, рассматриваемых в качестве исходных, и взяли блочный алгоритм Флойда-Уоршелла, который также является хорошо распараллеливаемым. Известно, что с точки зрения вычислительной сложности первый алгоритм предпочтительнее на разреженных графах, а второй – на плотных. В то же время неясно, каковы диапазоны плотностей графов, при которых первый алгоритм будет потреблять процессорное время, меньшее, чем второй алгоритм. В статье описаны реализации многопоточных параллельных алгоритмов на многоядерных процессорах, которые поразному используют такие примитивы синхронизации, как мьютекс, условная переменная, блокировка и атомарная операция. Проведя вычислительные эксперименты на 8-ядерном процессоре Intel(R) Core(TM) i7-10700 CPU @ 2.90GHz, мы обнаружили, что каждый алгоритм имеет предпочтительную плотность графов. В случае многопоточной параллельной реализации блочный алгоритм Флойда-Уоршелла имеет меньшее время работы, чем алгоритм Дейкстры, если плотность графа больше 0,5. В противном случае алгоритм Дейкстры работает быстрее. В случае однопоточной реализации точка разделения – 0,43.

Ключевые слова: Разреженный граф, плотный граф, задача APSP, алгоритмы семейства Дейкстры, алгоритмы семейства Флойда-Уоршелла, многоядерный процессор, многопоточная реализация, сравнение



Anatoly Prihozhy is full professor at Computer and system software department of Belarussian national technical university, Doctor of Science (1999) and Full Professor (2001). His research interests include programming and hardware description languages, parallelizing compilers, and computer aided design techniques and tools for software and hardware at logic, high and system levels, and for incompletely specified logical systems. He has over 300 publications in Eastern and Western Europe, USA and Canada. Such worldwide publishers as IEEE, Springer, Kluwer Academic Publishers, World Scientific and others have published his works.

Прихожий А.А., профессор кафедры «Программное обеспечение информационных систем и технологий» Белорусского национального технического университета, д.т.н. (1999), диплом профессора (2001). В сферу его научных интересов входят языки программирования и описания аппаратуры, распараллеливающие компиляторы, методы и средства автоматизированного проектирования программных и аппаратных средств на логическом, высоком и системном уровнях, а также не полностью определенных логических систем. Имеет более 300 публикаций в Восточной и Западной Европе, США и Канаде. Его работы опубликованы в таких мировых издательствах, как IEEE, Springer, Kluwer Academic Publishers, World Scientific и других.

E-mail: prihozhy@bntu.by



Karasik Oleg is a Technology Lead at ISsoft Solutions (part of Coherent Solutions) in Minsk, Belarus, and PhD in Technical Science. His research interests include parallel multithreaded applications and the parallelization for multicore and multiprocessor systems.

Карасик О.Н., ведущий инженер иностранного производственного унитарного предприятия «ИССОФТ СОЛЮШЕНЗ» (часть Coherent Solutions), г. Минск, Беларусь, к.т.н. (2019). В сферу его научных интересов входят параллельные многопоточные приложения и распараллеливание для многоядерных и многопроцессорных систем.

E-mail: karasik.oleg.nikolaevich@gmail.com

RULKO E.V.

COMPLEXIFICATION THROUGH GRADUAL INVOLVEMENT AND REWARD PROVIDING IN DEEP REINFORCEMENT LEARNING

*Military Academy of the Republic of Belarus
Минск, Республика Беларусь*

Training a relatively big neural network within the framework of deep reinforcement learning that has enough capacity for complex tasks is challenging. In real life the process of task solving requires system of knowledge, where more complex skills are built upon previously learned ones. The same way biological evolution builds new forms of life based on a previously achieved level of complexity. Inspired by that, this work proposes ways of increasing complexity, especially a way of training neural networks with smaller receptive fields and using their weights as prior knowledge for more complex successors through gradual involvement of some parts, and a way where a smaller network works as a source of reward for a more complicated one. That allows better performance in a particular case of deep Q-learning in comparison with a situation when the model tries to use a complex receptive field from scratch.

Ключевые слова: *deep reinforcement learning, Q-learning, curriculum learning, distillation model, reward shaping*

Introduction

Reinforcement learning (RL) offers a powerful framework for decision-making tasks, where agents learn from interactions with an environment to improve their performance over time. The agent observes states and rewards from the environment and acts with a policy that maps states to actions. Deep Reinforcement Learning (DRL) denotes the combination of deep learning with RL. DRL uses deep neural networks to train powerful function approximators to address complicated domains [1]. But DRL still faces difficulties, especially when convergence of deep neural networks requires learning complicated concepts in environments with sparse feed-back. That difficulty has some intuitive explanation. Imagine a human baby behind a wheel with the target to drive home and the amount of attempts that it would take to achieve some positive feedback. Or the task of getting some chemical substance in a lab through the trial and error method by a person who is totally unfamiliar with chemistry. These processes require learning consecutive sets of skills, where each set is built upon previously learned ones. It's especially attributable to humans and high-level animals. For a person it requires learning how to control bodily functions, getting basic knowledge from parents, kindergarten, and school and so on. A fox baby isn't able to hunt, until acquiring all the necessary skills. In addition to learning procedure, defining a structure of a neural network of sufficient capacity, that can learn the set of consecutive tasks and effectively converge, also represents a hurdle. The process of evolution in nature generally goes from simple neural structures to more complex. Inspired by that, this work describes an example *Complexification Through Gradual Involvement And Reward Providing* used for the game of Snake within the framework of deep Q-learning.

Related Work

Training a model on examples of increasing difficulty, progressively providing more challenging data or tasks as the policy improves, is called *Curriculum Learning* (CL) [2]. As the name suggests, the idea behind the approach borrows from human education, where complex tasks are taught by breaking them into simpler parts. This is used now in advanced spheres like teaching quadrupedal robots to perform complex movements [3], quantum architecture search [4] and many others. There are a lot of strategies of CL. An approach that uses separate policies for each skill [5] and a similar one that distills the specialist controllers into a single generalist transformer policy [6] both seem to be closest to the approach described in the current paper because of connection between successive teaching and allocating some network capacity for newly formed skills. Another related approach is called *Progressive Neural Networks* [7]. A progressive network is composed of multiple columns, and each column is a policy network for one specific task. It starts with one single column for training the first task, and then the number of columns increases with the number of new tasks. While training on a new task, neuron weights of the previous columns are frozen and representations from those frozen tasks are applied to the new column via a collateral connection to assist in learning of a new task [1]. Also the idea of *Distillation Model* involves training a smaller model first and then building a big one that will imitate the first one in order to kick start the large model's learning progress [8]. In spite of some similarities, the suggested approach of *Complexification Through Gradual Involvement* unlike others uses successive allocation of the network capacity for a current single task through increasing the perception field, i. e. the state space. Reinforcement Learning from Human Feedback (RLHF) [9] learns from

human feedback instead of relying on an engineered reward function. *Reward Providing* unlike that uses a less complex network instead of a human expert as a source of reward for training a more complex one.

Complexification Through Gradual Involvement And Experimental Studies

Complexification can be performed in different directions: just network capacity, the amount of sensory information (state vector) and subsequent network capacity, and the action vector. In the current work only the case of increasing the size of a state vector is considered. Suggested approach is described based on the game of Snake [10], which is a modified version of the original game [11]. The screen of the game is represented on Figure 1. Initially as an input vector the snake takes the following 11 parameters that are relative to its head's position [10]: danger straight within 1 step, danger right within 1 step, danger left within 1 step, moving left, moving right, moving up, moving down, food left, food right, food up, food down.

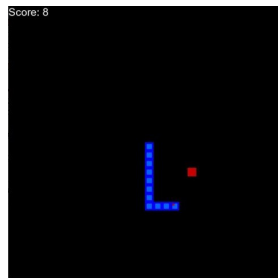


Figure 1. The Snake game

The result of training is represented on Figure 2.

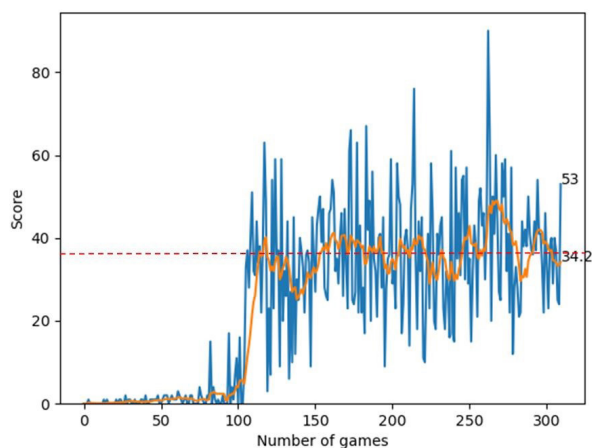


Figure 2. Training result for 11 values

It takes approximately 100 games to converge and the average result is about 35 scores. Also it requires epsilon-greedy strategy for exploration during the first 80 epochs. Without it the network doesn't converge at all. The analysis of the way the snake ends up shows that it tends to coil in itself – Figure 3. That situation is

supposedly attributable to the inability of the snake to get understanding of the location of its own parts. Let's increase the input vector by adding the following parameters:

- snake tail to the right of the head;
- snake tail to the left of the head;
- snake tail to the front of the head;
- relative distance to the right wall;
- relative distance to the left wall;
- relative distance to the front wall;
- last turn left;
- last turn right.



Figure 3. Coiling up

Now the input vector is comprised of 19 parameters. The result of training is represented on Figure 4.

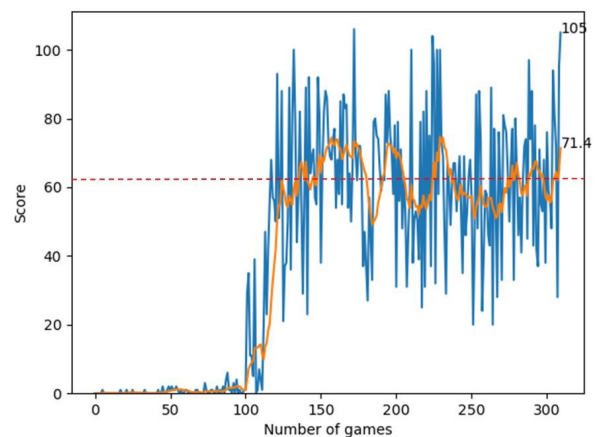


Figure 4. Training result for 19 values

Now it takes approximately 150 games to converge and the average result is about 62. If we want to start the learning process of a model with a bigger input vector not from scratch, but with weights of a smaller one, the procedure in this case is straightforward. For the current network architecture it requires copying of the weights of the second fully connected layer (FC 2) and the weights of the first fully connected layer (FC 1) concatenated with a tensor of random values of shape (8, 256) in order to fit the newly formed FC 1 layer. The scheme of the process is presented on Figure 5. The number of input and output features of each layer is specified in parenthesis.

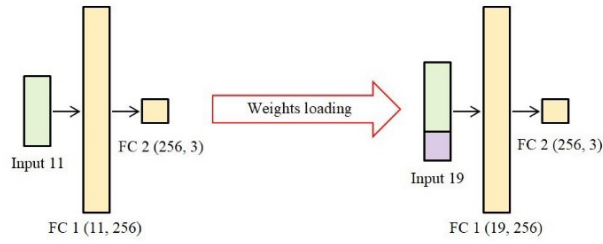


Figure 5. Weights loading

Modern frameworks like PyTorch provide a convenient way of loading weights from one model to another. The result of training of the network with loaded weights from the experiment on Figure 2 is represented on Figure 6.

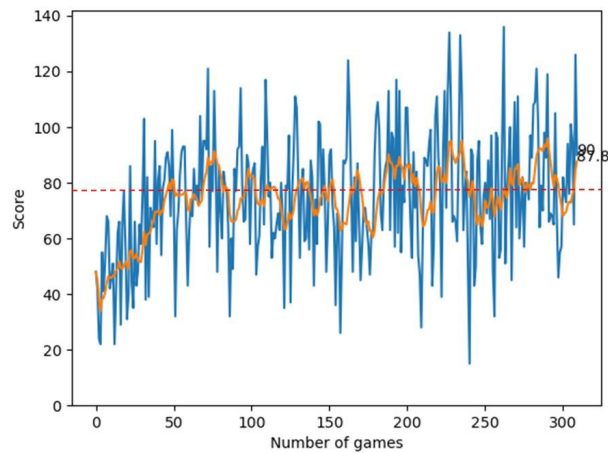


Figure 6. Training result after weights loading

It demonstrates that with prior knowledge it takes approximately 50 games to converge to even better scores in comparison with the experiment on Figure 4, which is about 3 times less in terms of count of games. Due to the nature of neural networks, they can rely only on known part of the input vector, performing rational activity in terms of the environment and simultaneously figuring out the way of applying newly added part of the input vector. It's important to note that it doesn't require any initial exploration as it were in both cases with a smaller and bigger vectors starting from scratch. But it seems that in more complicated scenarios a way of exploring possibilities that come with added input vector might be required. The next step is to add a convolutional (2d) head to the neural network that will partially observe the environment. For this case a bit different approach will be demonstrated, which involves turning off some advanced parts of the neural network, like the convolutional head in this example, while training the initial smaller parts. In essence, this process is similar to training a smaller neural network and loading its weights into a correspondent part of a bigger one. In order to make it easier for the agent to learn, the convolutional head is provided not with the full environment, but with black and white cropped fragment of shape (8, 8) around snake's head, rotated according to

its current direction – Figure 7. There are several sequential stages of training. During a “Zeros” stage the output of the convolutional head is always a tensor of zeros and the head is frozen. In this case the agent is supposed to rely only on the 1d head. A “Noise” stage involves processing the image by the frozen convolutional head with randomly initialized weights.

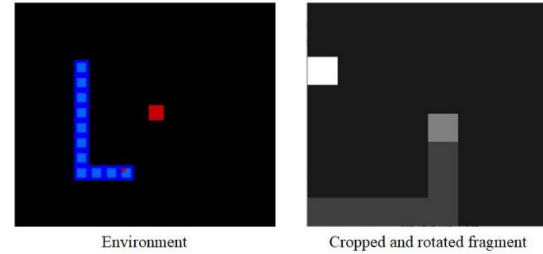


Figure 7. Input preprocessing

The absence of any structured useful information about the environment from 2d head supposedly will make the rest of the network insensitive to any information from that head. The initial intent of that is to prevent possible sporadic behavior of the network on the transition between the previous stage and involving the 2d head, when the network has been trained with the constant tensor of only zeros and it unexpectedly gets a tensor of random values. An “Involving” stage implies freezing the 1d head and unfreezing the 2d head in order to provide some prior knowledge and kick start the learning process of 2d head. A “Both heads” stage involves simultaneous training of both 1d and 2d heads. Architecture of the neural network (without ReLUs) is presented on Figure 8.

A set of experiments has been conducted in order to practically evaluate performance, depending on redistribution of the entire amount of 3000 games between different stages using fixed hyperparameters. Each experiment the agent uses epsilon-greedy strategy during first 280 games and then the greedy one.

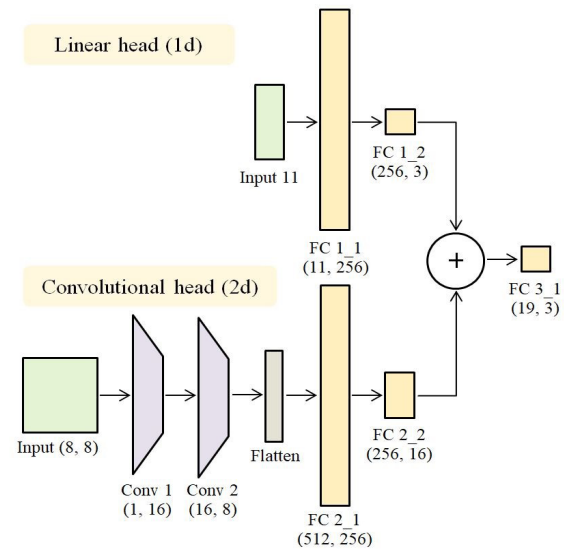


Figure 8. Network architecture

The first experiment involves training the agent during all of the episodes (games) using a “Zeros” stage, which means it effectively uses only 1d head – Figure 9.

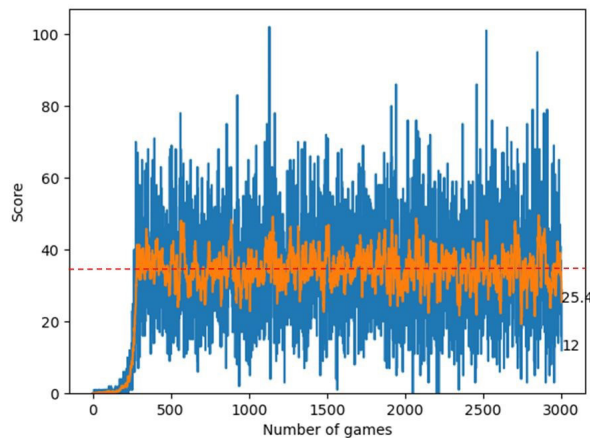


Figure 9. Training using only “Zeros” stage

Unsurprisingly, the result doesn't seem much different from Figure 2. It has the average score of 33 over 100 last games. The network just learns to ignore a tensor of zeros from the 2d head and rely only on 1d part that uses 11 values, the same as in case on Figure 2. It's necessary to mention that in spite of pretty stable average score, the dispersion of scores for each game (blue color) is pretty high.

The second experiment involves training the agent during all of the episodes using the “Both heads” stage, which means it uses both heads from the beginning. The result of training is presented on Figure 10.

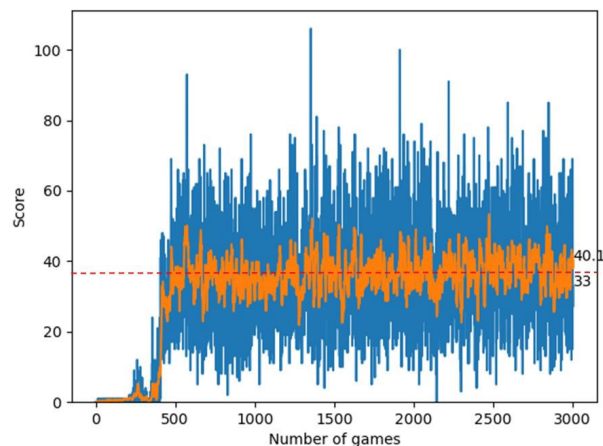


Figure 10. Training using only “Both heads” stage

It has the average score of 36 over 100 last games. The result is not far from the previous experiment, which means that the network isn't able to utilize data from the 2d head, “turns that head off”, and still relies only on 1d head as in the case with “Zeros” stage.

The third experiment involves training the agent on 500 games using “Zeros” stage and 2500 games using “Both heads” stage – Figure 11. In this case during the

first stage the network learns how to utilize the 1d head and then, with its weights trained, involves the second one in the training process. The average score over 100 last games is 54, which is better than in the previous cases. The important point here is that such a score can't be achieved by training of two heads simultaneously.

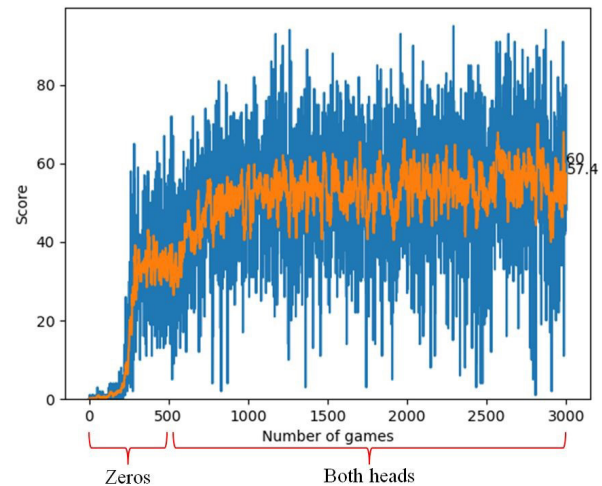


Figure 11. Training using “Zeros” and “Both heads” stages

The forth experiment involves training the agent on 500 games using “Zeros” stage, 1000 games using “Involving” stage, and 1500 games using “Both heads” stage. The result of the experiment is demonstrated on Figure 12.

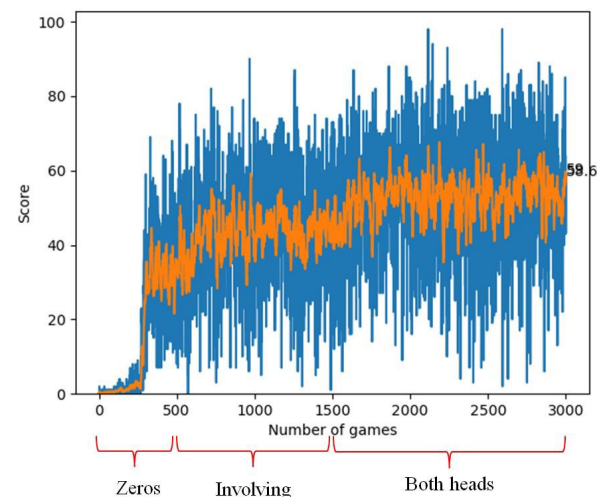


Figure 12. Training using “Zeros”, “Involving” and “Both heads” stages

The final average score is 54 and is the same as in the previous experiment, which means that using “Involving” stage doesn't improve the results.

The fifth experiment involves training the agent on 500 games using “Zeros” stage, 500 games using “Noise” stage, 500 games using “Involving” stage, and 1500 games using “Both heads” stage. The result of the experiment is demonstrated on Figure 13.

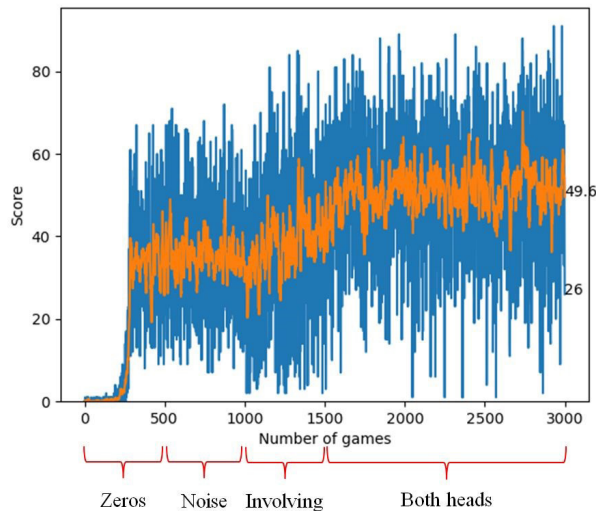


Figure 13. Training using “Zeros” and “Both heads” stages

Here also the final average score of 52 doesn't deviate too much from the third experiment, which means that using “Noise” stage also doesn't improve the results.

Complexification Through Reward Providing And Experimental Studies

Transition from a simpler neural network to a more complicated one can also be conducted through reward shaping. In the first experiment the network is provided with the entire game screen rotated relatively to its head – Figure 14. With the established set of hyperparameters, using epsilon-greedy strategy for exploration during first 5000 games, the network doesn't converge at all. At the same time, the experiment that has been described earlier, of using liner layer with the manually constructed 11 values demonstrates the result with an average score about 35 (Figure 2).

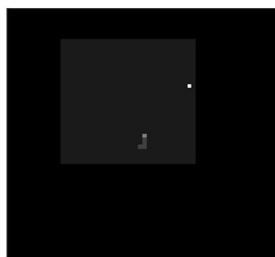


Figure 14. Full receptive field

The network in this case has the following architecture – Figure 15.

The suggested mechanism of Complexification Through Reward Providing involves usage of predicted value function from a smaller neural network, trained during the first stage in the same environment, as a part of reward for a more complicated one, and is presented on Figure 16.

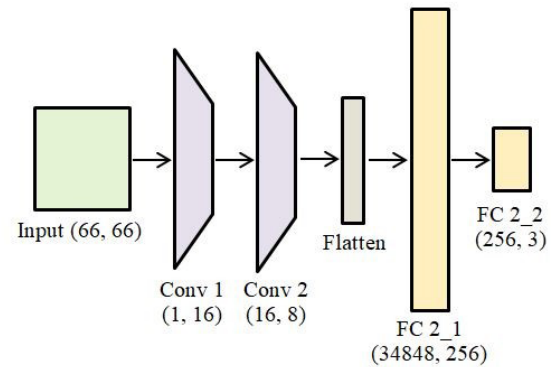


Figure 15. Network architecture

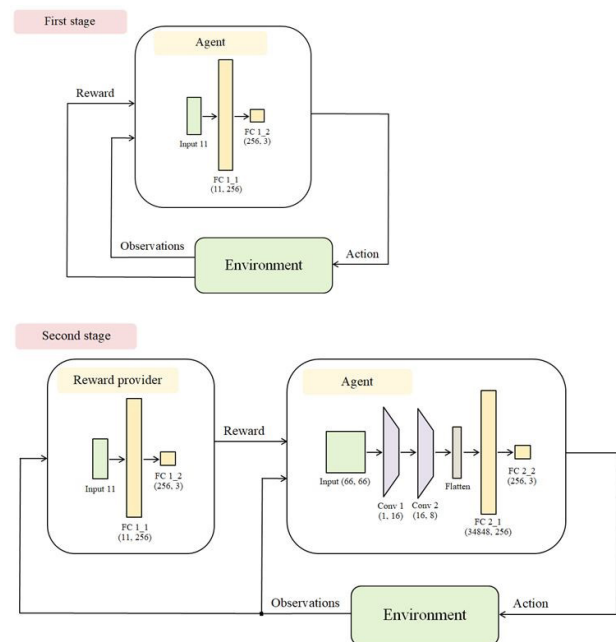


Figure 16. Mechanism of complexification through reward providing

The result of training when the reward is the maximum value of a Q-function for a given state from a smaller network is presented on Figure 17.

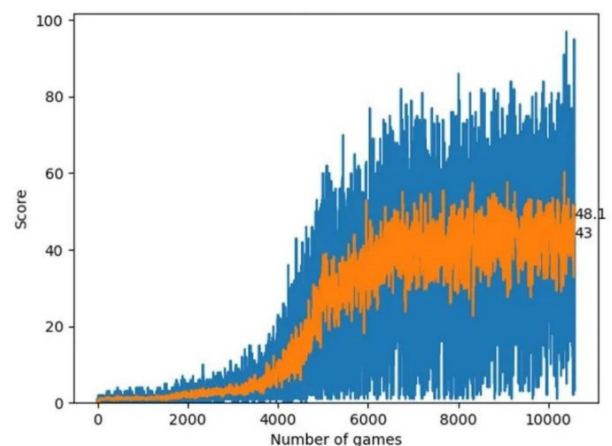


Figure 17. Training only with the reward provided

The result of training with an equal contribution of a real reward and the maximum of Q-function for a given state from the smaller network is the following –

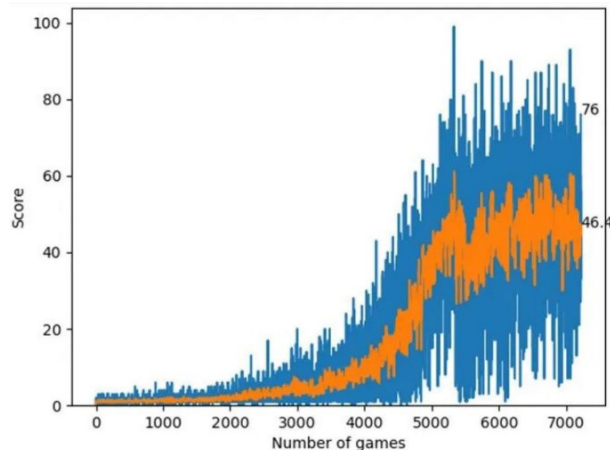


Figure 18 (upper image). The same experiment but with longer exploration phase is presented on Figure 18 (lower image).

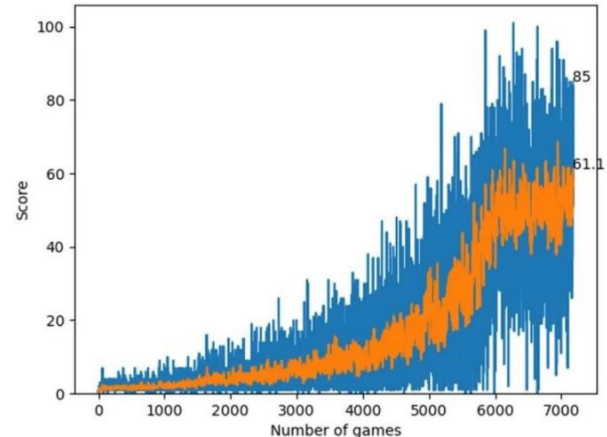


Figure 18. Training with equal contribution of reward

It has an average score about 50 which is better in comparison with the case with just using 11 values. It means that the result of a bigger network trained using some reward function provided by the smaller network is better than the result of the smaller network in that environment. In this particular case it's connected with a richer state space that a bigger network can observe, but more importantly, the bigger network doesn't converge at all from scratch without using such a gimmick.

The result of training the network on the full receptive field from scratch without reward providing is presented on Figure 19.

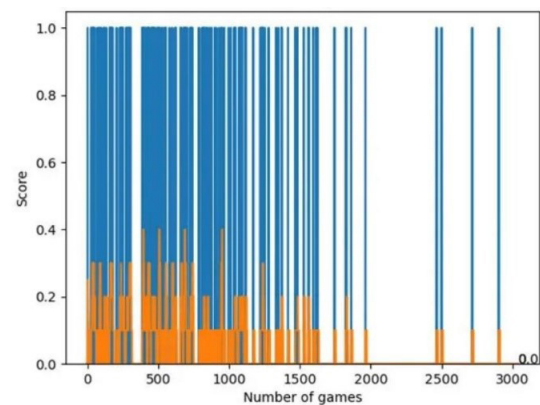


Figure 19. Training with equal contribution of rewards

Complexification Through Assistance Providing And Experimental Studies

In the previous case the bigger network acted in the environment but it was rewarded by a smaller one. It corresponds to a script: “You’ll act and I’ll tell you what’s good or bad”. For the purpose of research it seems reasonable to consider an alternative scenario

which corresponds to: “You’ll be provided with some experiments by me, and the environment will tell you the outcome of certain actions”. During the second stage of training actual behavior is generated by a pretrained assistant model, and the agent is trained on the experience replay buffer, but instead of input vector of 11 parameters it uses the corresponded 2d representation – Figure 20.

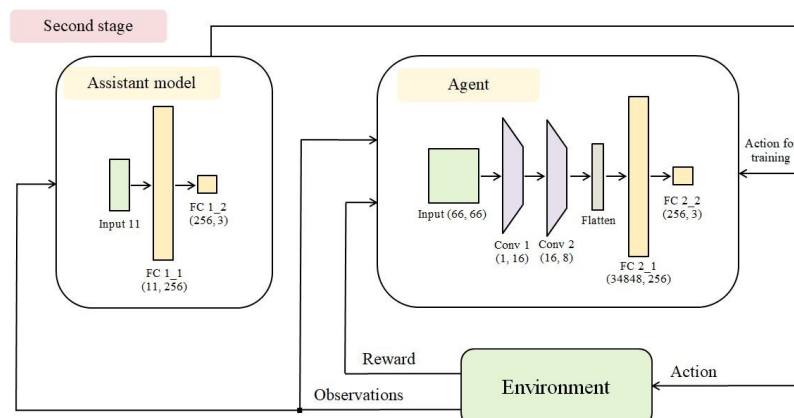


Figure 20. Training with equal contribution of rewards

The agent is switching between the aforementioned way of training and training on its own in order to assess its performance. The result of training in this case is worse than in the previous one – Figure 21.

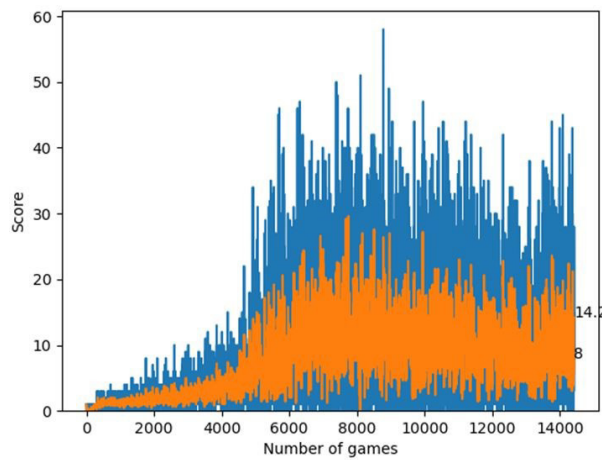


Figure 21. Training with assistance providing

Conclusions And Future Work

This work is based on considering a pretty trivial example of the Snake game and describes the process of using weights of a previously trained network as prior

knowledge for a more complicated one, as well the process of reward providing. It was shown that the suggested approaches provide a way of achieving higher scores without any hyperparameter search in comparison with the cases of training complexified networks from scratch. Future work requires conducting a more extensive set of experiments, including different environments and RL algorithms for getting conclusive information about applicability of the approaches. It's necessary to consider different possible dimensions of increasing complexity, not only what's directly connected with a receptive field, i. e. a state vector. It seems that in this particular case of the Snake game we can use not a single current state of the game, but also several previous states and gradually add some recurrent part to the network. Future research can also be dedicated to finding automatically the necessary directions of extending network capacity, unlike it was done manually in the current work. In case of reward provider it also seems reasonable to shift the reward from a smaller network to the real one from the environment over time of training and further research can be dedicated to that, as well as to use a chain of successively trained networks where each previous one provides reward construction for the next one. Usage of a combination of the reward providing and assistance providing techniques may also be studied in the future.

REFERENCES

1. **Zhuangdi Zhu** et al. Transfer Learning in Deep Reinforcement Learning: A Survey. 2023. arXiv: 2009.07888.
2. **Petru Soviany** et al. Curriculum Learning: A Survey. 2022. arXiv: 2101.10382.
3. **Vassil Atanassov** et al. Curriculum-Based Reinforcement Learning for Quadrupedal Jumping: A Reference-free Design. 2024. arXiv: 2401.16337.
4. **Yash J. Patel** et al. Curriculum reinforcement learning for quantum architecture search under hardware errors. 2024. arXiv: 2402.03500.
5. **David Hoeller** et al. ANYmal Parkour: Learning Agile Navigation for Quadrupedal Robots. 2023. arXiv: 2306.14874.
6. **Ken Caluwaerts** et al. Barkour: Benchmarking Animal-level Agility with Quadruped Robots. 2023. arXiv: 2305.14654.
7. **Andrei A. Rusu** et al. Progressive Neural Networks. 2022. arXiv: 1606.04671.
8. **Enric Boix-Adsera**. Towards a theory of model distillation. 2024. arXiv: 2403.09053.
9. **Timo Kaufmann** et al. A Survey of Reinforcement Learning from Human Feedback. 2024. arXiv: 2312.14925 [cs.LG]. URL: <https://arxiv.org/abs/2312.14925>.
10. **E. Rulko**. Complexification Through Gradual Involvement in Deep Reinforcement Learning. <https://github.com/Eugene1533/snake-ai-pytorch-complexification>. 2024.
11. **P. Loeber**. Reinforcement Learning With PyTorch and Pygame. <https://github.com/patrickloeber/snake-ai-pytorch>. 2021.

РУЛЬКО Е.В.

УСЛОЖНЕНИЕ ПОСРЕДСТВОМ ПОСТЕПЕННОГО ВОВЛЕЧЕНИЯ И ПРЕДОСТАВЛЕНИЯ ВОЗНАГРАЖДЕНИЯ В ГЛУБОКОМ ОБУЧЕНИИ С ПОДКРЕПЛЕНИЕМ

Военная академия Республики Беларусь
г. Минск, Республика Беларусь

Тренировка нейронной сети, в рамках задач обучения с подкреплением, имеющей достаточную вычислительную емкость для решения сложных задач достаточно проблематична. В реальной жизни процесс решения задач требует системы знаний, где процесс изучения более сложных навыков основывается на использовании уже имеющихся. Аналогично, в ходе биологической эволюции, новые формы жизни базируются на достигнутом на предыдущем этапе уровне структурной сложности. Используя данные идеи, в настоящей работе предложены способы увеличения сложности архитектуры нейронных сетей, в частности способ тренировки сети с меньшим рецептивным полем и использованием натренированных весов в качестве отправной точки для более сложных сетей через постепенное вовлечение некоторых частей, а также способ предполагающий использование более простой сети с целью предоставления вознаграждения для более сложной. Это позволяет получить лучшую производительность в конкретном описанном примере, используя Q -обучение, по сравнению со сценариями, когда сеть пытается использовать больший вектор входной информации с нуля.

Ключевые слова: глубокое обучение с подкреплением, Q -обучение, обучение по куррикулуму, дистилляционная модель, формирование вознаграждения в обучении с подкреплением



Eugene Rulko, PhD, associate professor in computer science. The head of the research laboratory of military operation simulation of the educational institution «Military academy of the Republic of Belarus». Research interests: deep learning, computer vision, reinforcement learning, reflexive control.

Рутько Евгений Викторович, кандидат технических наук, доцент. Начальник научно-исследовательской лаборатории моделирования военных действий учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь». Сфера научных интересов: глубокое обучение, машинное зрение, обучение с подкреплением, рефлексивное управление.

E-mail: eugeni1533@gmail.com

НАПРАСНИКОВ В.В., БОРОДУЛЯ А.В., ПОЛОЗКОВ Ю.В., КУНКЕВИЧ Д.П., ЖУЙ ВАН ЦЗЫ

**МОДАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ПЛАСТИНЧАТЫХ ЯЧЕЙСТЫХ ОБЪЕКТОВ
ПЕРИОДИЧЕСКОЙ СТРУКТУРЫ**Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь

Описывается используемый метод расчета собственных частот и форм колебаний. Представлены фрагменты кода для построения для некоторых типов заполнителя. Приводятся полученные частоты и формы собственных колебаний для трех видов ячеек.

Ключевые слова: ячейстые объекты, распределение энергии при собственных колебаниях

Введение

Одной из важнейших задач проектирования современных конструкций является снижение их материалоемкости [1-7]. Избыточный вес конструкции приводит, например для летательных аппаратов, к существенному завышению расхода топлива (заряда батарей при использовании электрической тяги), а значит снижает такие важные эксплуатационные характеристики как дальность полета и маневренность.

С другой стороны, конструкция летательного аппарата должна обладать необходимой жесткостью и прочностью, обеспечивающими целостность его конструкции.

Расчет собственных частот и форм колебаний, или модальный анализ, предназначен для предварительной оценки динамического поведения механической системы при переменных нагрузках. В ходе модального анализа можно определить собственные частоты и формы колебаний системы, а также некоторые другие параметры, характеризующие динамические свойства конструкции.

Материалы, представленные в статье, описывают варианты решения подобных задач на основе конечно-элементных моделей для трех вариантов заполнителя одной из конструкций.

**Методика анализа собственных форм
колебаний**

Уравнение динамического равновесия (1) с начальными условиями (2) в конечно-элементной формулировке выглядит следующим образом:

$$M\ddot{\vec{U}} + C\dot{\vec{U}} + K\vec{U} = \vec{P}(t), \quad (1)$$

$$\vec{U}(t_0) = \vec{U}_0, \dot{\vec{U}}(t_0) = \dot{\vec{U}}_0. \quad (2)$$

Колебания называются собственными, если происходят при отсутствии внешней нагрузки. Если при этом затухание в системе отсутствует ($C=0$),

то эти колебания продолжаются бесконечно долго. Уравнения (1) принимают вид (3):

$$M\ddot{\vec{U}} + K\vec{U} = \vec{0}. \quad (3)$$

Конечно, в действительности такая ситуация невозможна, однако теоретическое ее рассмотрение позволяет выявить некоторые особенные характеристики конструкции, несущие в себе скрытую информацию об этой конструкции, использование которой позволяет значительно упростить решение многих задач.

Будем искать решение системы (3) в виде $\vec{U} = \hat{\vec{U}} \sin(\omega t)$, где $\hat{\vec{U}}$ – неизменный во времени вектор.

Так как $\ddot{\vec{U}} = \hat{\vec{U}}(-\omega^2 \sin(\omega t))$ подставим в (3), получим $(K - \omega^2 M)\hat{\vec{U}} \sin(\omega t) = \vec{0}$.

Поскольку $\sin(\omega t) \neq 0$, не равен нулю тождественно, значит $(K - \omega^2 M)\hat{\vec{U}} = \vec{0}$.

Для того, чтобы существовало нетривиальное решение этой однородной системы линейных алгебраических уравнений, необходимо, чтобы:

$$\det(K - \omega^2 M) = 0, \quad (4)$$

уравнение (4) называют частотным уравнением.

Можно показать, что для вещественных положительно определенных матриц (какими и являются K и M) уравнение (4) имеет n различных положительных корней: $\omega_1^2, \omega_2^2, \dots, \omega_n^2$, а числа $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_n$ будут называться собственными частотами исходной конструкции. Упорядоченные по возрастанию $\omega_1 < \omega_2 < \dots < \omega_n$, они образуют вектор собственных частот $\vec{\omega}^T = (\omega_1 \omega_2 \dots \omega_n)$.

Внешние силовые факторы и нелинейности в ходе модального анализа не учитываем.

После того, как из частотного уравнения (4) определены соответствующие частоты:

$$\vec{\omega}^T = (\omega_1 \omega_2 \dots \omega_n), \quad (5)$$

$$\text{уравнения } (K - \omega^2 M) \cdot \hat{\vec{U}} = \vec{0} \quad (6)$$

$$\text{выглядят так: где } \hat{\vec{E}}^{(n)} \cdot \hat{\vec{U}}_n = \vec{0}, \quad (7)$$

Г

где $\tilde{E}^{(n)} = K - \omega_n^2 M$.

(8)

То есть каждое из (7) получается последовательной подстановкой в (6) очередной собственной частоты.

Как видно, матрица $\tilde{E}^{(n)}$ своя для каждого ω_n и для нее (6) удовлетворяются тождественно, то есть существует бесконечное множество векторов $\hat{U}_n$, являющихся решением (6). Это означает, что амплитуды собственных колебаний получить невозможно. Однако форму колебаний получить можно. Для этого достаточно зафиксировать равной какому-то числу одну из компонент вектора $\hat{U}_n$, а остальные компоненты получатся из решения системы (7) вычисленными по отношению к фиксированной.

Выберем, например, первую компоненту $\hat{U}_n$ равной 1:

$$\hat{U}_n = \begin{pmatrix} 1 \\ \hat{U}_{2n} \\ \dots \\ \hat{U}_{Nn} \end{pmatrix}. \quad (9)$$

Здесь N – общее количество степеней свободы; n – номер собственной частоты, для которой будем определять собственный вектор.

Тогда система (7) переписывается в следующем виде:

$$\begin{pmatrix} e_{11}^{(n)} & e_{12}^{(n)} & e_{13}^{(n)} & \dots & e_{1N}^{(n)} \\ e_{21}^{(n)} & e_{22}^{(n)} & e_{23}^{(n)} & \dots & e_{2N}^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_{N1}^{(n)} & e_{N2}^{(n)} & e_{N3}^{(n)} & \dots & e_{NN}^{(n)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ \hat{U}_{2n} \\ \dots \\ \hat{U}_{Nn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ \dots \\ 0 \end{pmatrix}. \quad (10)$$

Обозначим

$$e = \begin{pmatrix} e_{21}^{(n)} \\ \dots \\ e_{N1}^{(n)} \end{pmatrix}, \quad \tilde{E}_{10}^{(n)} = (e_{12}^{(n)} \quad e_{13}^{(n)} \quad \dots \quad e_{1N}^{(n)}),$$

$$\tilde{E}_{00}^{(n)} = \begin{pmatrix} e_{22}^{(n)} & e_{23}^{(n)} & \dots & e_{2N}^{(n)} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ e_{N2}^{(n)} & e_{N3}^{(n)} & \dots & e_{NN}^{(n)} \end{pmatrix}, \quad \hat{U}_{0n} = \begin{pmatrix} \hat{U}_{2n} \\ \dots \\ \hat{U}_{Nn} \end{pmatrix},$$

тогда

$$\begin{pmatrix} e_{11}^{(n)} & \tilde{E}_{10}^{(n)} \\ \tilde{E}_{01}^{(n)} & \tilde{E}_{00}^{(n)} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ \hat{U}_{0n} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \vec{0} \end{pmatrix} \quad (11)$$

$$e_{11}^{(n)} + \tilde{E}_{10}^{(n)} \cdot \hat{U}_{0n} = 0 \quad (12)$$

$$\tilde{E}_{01}^{(n)} + \tilde{E}_{00}^{(n)} \cdot \hat{U}_{0n} = 0. \quad (13)$$

Матрица $\tilde{E}_{00}^{(n)}$ имеет определитель отличный от нуля, тогда систему (10) можно разрешить относительно $\hat{U}_{0n}$

$$\hat{U}_{0n} = -(\tilde{E}_{10}^{(n)})^{-1} \cdot e_{11}^{(n)}. \quad (14)$$

Условие (12) является хорошим контролем точности проведенных вычислений.

Амплитуды перемещений полученные из (14), вместе с единичной первой компонентой образуют собственный вектор, соответствующий n -той собственной частоте.

Для удобства собственные векторы представляются в безразмерной форме. Для этого выбирается обычно максимальная из компонент u_j -вектора и на нее делятся все компоненты собственного вектора

$$\bar{\varphi}_n = \begin{pmatrix} \varphi_{1n} \\ \varphi_{2n} \\ \dots \\ \varphi_{Nn} \end{pmatrix} = \frac{1}{u_j} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ \hat{U}_{2n} \\ \hat{U}_{3n} \\ \dots \\ \hat{U}_{Nn} \end{pmatrix}.$$

Здесь $u_j = \max |1, \hat{U}_{2n}, \dots, \hat{U}_{Nn}|$, $\bar{\varphi}_n$ – вектор формы колебаний по n -ому тону колебаний.

Аналогично вычисляются и другие собственные формы.

Матрица, составленная из собственных форм колебаний, представляет собой матрицу собственных форм колебаний.

$$\Phi = (\bar{\varphi}_1, \bar{\varphi}_2, \dots, \bar{\varphi}_N) = \begin{pmatrix} \varphi_{11} & \varphi_{12} & \dots & \varphi_{1N} \\ \varphi_{21} & \varphi_{22} & \dots & \varphi_{2N} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ \varphi_{N1} & \varphi_{N2} & \dots & \varphi_{NN} \end{pmatrix}.$$

Второй индекс указывает на номер собственной частоты, а первый – на компоненту в векторе.

Заметим, что вычисленные частоты и формы используются и при решении задачи динамики методом разложения по собственным формам колебания. В этом методе на основе определения собственных частот и собственных форм колебаний вводятся новые координаты взамен геометрических, для которых уравнения (1) преобразуются так, что система становится несвязанной, то есть каждое уравнение такой несвязанной (расщепляющейся) системы можно будет решать отдельно от остальных.

Пример построения модели одной из конструкций с ячеистым заполнителем на встроенном языке в среде ANSYS

Исходный объект представляет кольцо над границами которого имеются две стенки заданной высоты. Верхние границы стенок подвержены сжимающим нагрузкам.

На рисунке 1 приведена часть кода для создания геометрической составляющей модели.

```

/PREP7
Setka_kol=10 !Кол-во линий сетки
R=2
Teta=12 !Угол сектора в градусах
R=2
Rb=10
Ri=6
Dlina=10
del=Dlina/10
delR=5*R/10
delR_FINISH=(Dlina+5*R)/20
nSEC=1
Pi=3.141592 !Число секций
al=Pi/10
! Определяем постоянные параметры для:
LENGTH = 100.0 ! длины стороны квадрата
THICKNESS = 0.1*R ! толщины пластины
! значения длины вектора сосредоточенной силы
FORCE = 100.0
DENSITY = 8.0e-6 ! плотности материала
Num=2000
! Определяем постоянные параметры для:
LENGTH = 100.0 ! длины стороны квадрата
YOUNG = 210000.0 ! модуля Юнга материала
THICKNESS = 0.1*R ! толщины пластины
! значения длины вектора сосредоточенной силы
FORCE = 100.0
DENSITY = 8.0e-6 ! плотности материала

!*****
! Задаем толщину равную h2 для стенок OUT
h2=THICKNESS
! Задаем толщину равную h3 для стенок IN
h3=THICKNESS/5
/PREP7
Xc=0 $ Yc=0 $ Zc=0 !Центр окружности
K, 1, Xc, Yc, Zc
!переходим в цилиндрическую СК
CSYS,1
Setka_alfa=10 $ Setka_RAD=5
RAD=(RB-Ri)/Setka_RAD $ alfa=360/Setka_alfa
K_Mashtab_RB=1.2 $ K_Mashtab_Ri=0.8
! Переменной KMax присвоить max номер точки
*GET, KMax, Kp, , NUM, MAX
*DO, j, 1, Setka_alfa !Цикл по радиусам
NUMCMP, ALL
Ax=0 $ Ay=0 $ Bx=RB*K_Mashtab_RB $ By=alfa*(j-1)
Xbeg=Ax $ Ybeg=Ay $ Zbeg=0
K, KMax+2*j-1, Xbeg, Ybeg, Zbeg
Xend=Bx $ Yend=By $ Zend=0
K, KMax+2*j, Xend, Yend, Zend
L, KMax+2*j-1, KMax+2*j
*ENDDO
*DO, j, 1, Setka_RAD !Цикл по окружностям
Ax=Ri*K_Mashtab_Ri+RAD*(j-1)
circle, 1, Ax
*ENDDO

```

Рисунок 1. Часть кода для создания геометрической составляющей модели

Результаты моделирования для трех вариантов ячеек

Пример такого изделия с радиальными ячейками представлен на рисунке 2.

Результат расчета собственных форм представлен на рисунке 3.

Пример изделия с заполнителем в виде шестиугольных сот представлен на рисунке 4.

Результат расчета собственных форм представлен на рисунке 5.

Пример изделия с заполнителем в виде квадратных ячеек представлен на рисунке 6.

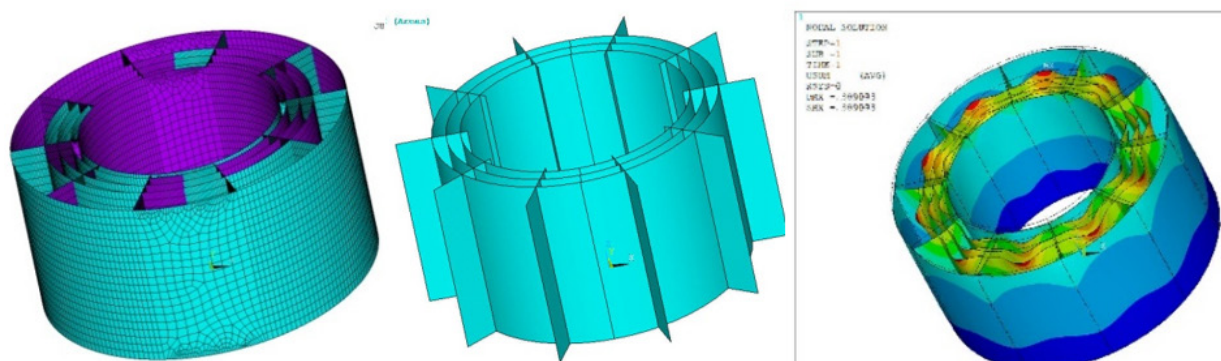


Рисунок 2. Слева конечно-элементная сетка на всем изделии, в центре -ячейки, справа – деформированное состояние при статическом нагружении

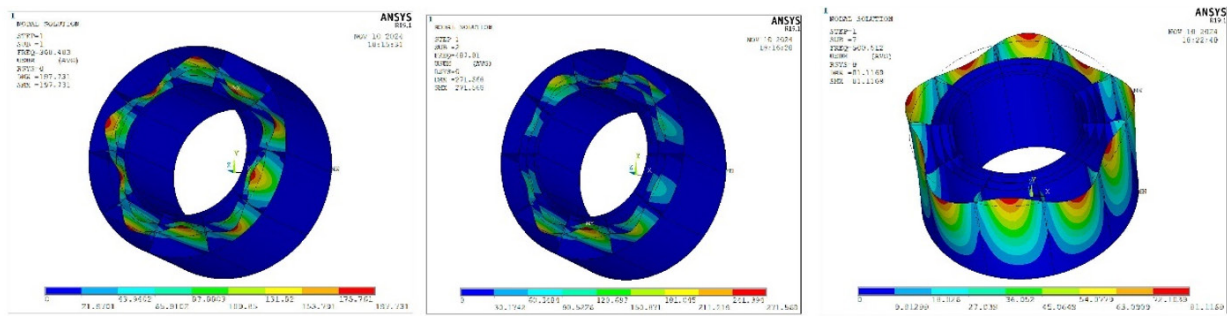


Рисунок 3. Собственные формы колебаний. Слева- форма с частотой 360,4 Гц, в центре - форма с частотой 407,0 Гц, справа – форма с частотой 500,5 Гц

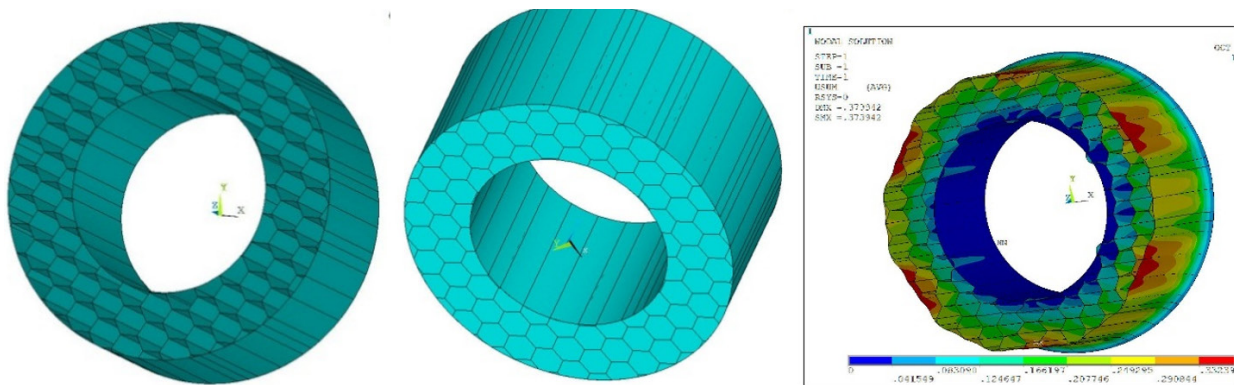


Рисунок 4. Изделие с заполнителем в виде шестиугольных сот (слева и в центре). Справа – деформированное состояние при статическом нагружении

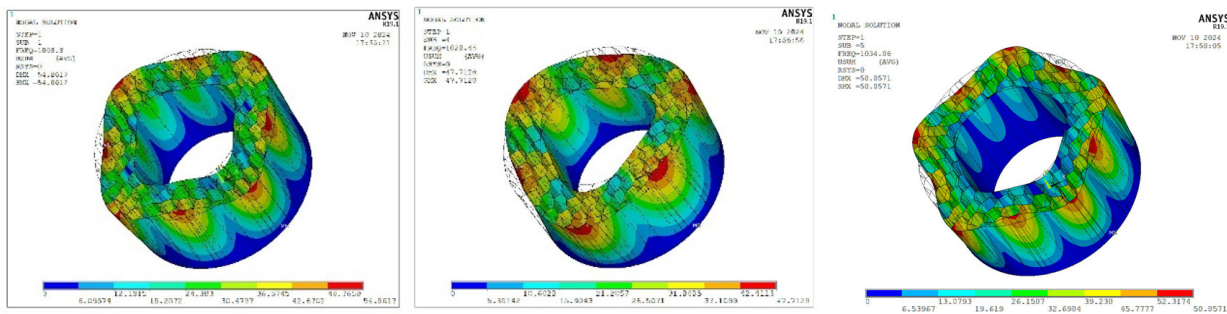


Рисунок 5. Собственные формы колебаний. Слева- форма с частотой 1009,9 Гц, в центре - форма с частотой 1020,4 Гц, справа – форма с частотой 1034,0 Гц

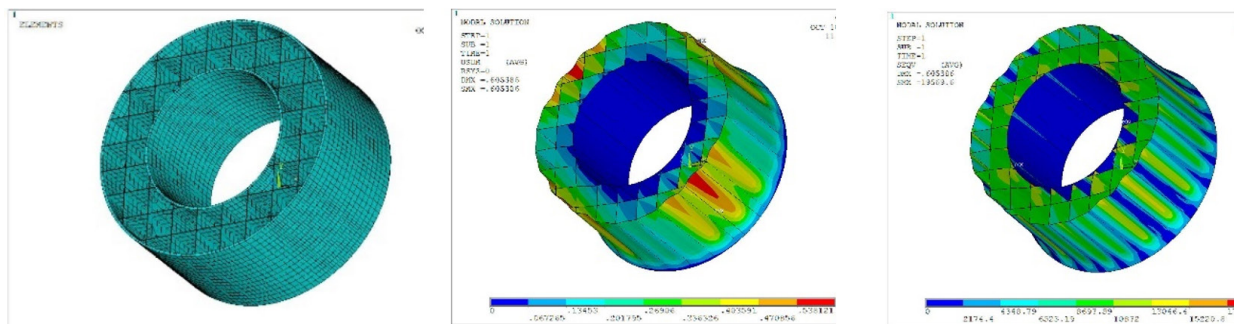


Рисунок 6. Слева конечно-элементная сетка на объекте, в центре – картина деформаций, справа – напряжения по Мизесу

Результат расчета собственных форм представлен на рисунке 7.

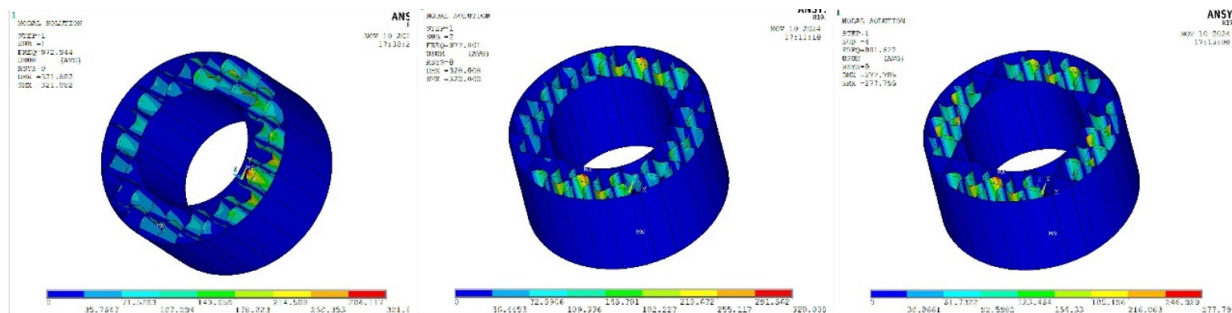


Рисунок 7. Собственные формы колебаний. Слева - форма с частотой 974,5 Гц, в центре - форма с частотой 977,0 Гц, справа – форма с частотой 981,6 Гц

Заключение

При реализации данного проекта установлено, что:

- при использовании различного вида заполнителей собственные частоты колебаний конструкции существенно отличаются. Для изделия с радиально-концентрическим заполнителем первая частота равна 360,4 Гц, для заполнителя в виде шестиугольных сот первая частота равна 1009,9 Гц, а для квадратных сот первая частота равна 974,5 Гц ;
- для изделия с радиально-концентрическим заполнителем на форме с частотой 360,4 Гц, и форме с частотой 407,0 Гц максимальные амплитуды возникают на цилиндрических частях заполнителя, а на форме с частотой 500,5 Гц – на внешней оболочке конструкции;

– на изделии с заполнителем в виде квадратных сот максимальные амплитуды возникают на внутренних пластинах заполнителя для всех рассмотренных собственных частот 974,5 Гц, 977,0 Гц и 981,6 Гц;

– на изделии с заполнителем в виде шестиугольных сот максимальные амплитуды возникают только на внешней оболочке конструкции для всех рассмотренных собственных частот 1009,9 Гц, 1020,4 Гц и 1034,0 Гц;

– таким образом распределение энергии при собственных колебаниях по различным частотам существенно зависит от вида заполнителя и должно учитываться при проектировании конструкций при наличии соответствующих ограничений в техническом задании.

ЛИТЕРАТУРА

1. Красновская С.В., Напрасников В.В. Исследование возможности идентификации прижимных усилий креплений конструкции с использованием нейронных сетей на основе конечно-элементной модели компрессорно-конденсаторной установки. Журнал "Информатика", 2017, № 4, с. 92-99.
2. Красновская С.В., Напрасников В.В. Обзор возможностей оптимизационных алгоритмов при моделировании конструкций компрессорно-конденсаторных агрегатов методом конечных элементов. Весці нацыянальнай акадэміі навук беларусі, 2016, № 2, серыя фізіка-тэхнічных навук, с. 92-99.
3. Напрасников В.В., Красновская С.В. Влияние упрощающих предположений в конечно-элементных моделях компрессорно-конденсаторных агрегатов на спектр собственных частот. Журнал "Системный анализ и прикладная математика", 2014, № 1-3, с. 51-55.
4. Бородуля А.В., Кункевич Д.П., Напрасников В.В., Полозков Ю.В. APDL-моделирование ячеистых конструктивных элементов деталей для аддитивного формообразования. Материалы НТК "Аддитивные технологии, материалы и конструкции", Гродно, 5-6 октября, 2016, с. 146-152.
5. Напрасников В.В., Ковалева И.Л., Полозков Ю.В., Кункевич Д.П., Бородуля А.В. Конечно-элементная модель подошвы с использованием ячеистых объектов. «Системный анализ и прикладная информатика». 2023;(2):24-30. DOI: 10.21122/2309-4923-2023-2-24-30
6. Напрасников В.В., Ван Ц., Ковалева И.Л., Новиков С.Н. Сценарии SpaceClaim в создании учебных моделей. «Системный анализ и прикладная информатика». 2023;(3):60-64. DOI: 10.21122/2309-4923-2023-3-60-64
7. Ковалева И.Л., Кункевич Д.П., Напрасников В.В., Полозков Ю.В., Чваньков А.А. Топологическая оптимизация конструктивной геометрии легких деталей. «Системный анализ и прикладная информатика». 2022;(3):50-55. DOI: 10.21122/2309-4923-2022-3-50-55

REFERENCES

1. Krasnovskaja S.V., Naprasnikov V.V. Issledovanie vozmozhnosti identifikacii prizhimnyh usilij kreplenij konstrukcii s ispol'zovaniem neyronnyh setej na osnove konechno-jelementnoj modeli kompressorno-kondensatornoj ustanovki. Zhurnal "Informatika", 2017 № 4, s. 92-99.
2. Krasnovskaja S. V., Naprasnikov V. V. Obzor vozmozhnostej optimizacionnyh algoritmov pri modelirovanii konstrukcij kompressorno-kondensatornyh agregatov metodom konechnykh jelementov. Vesci nacyjanal'naj akadjejp navuk belarusi, 2016 № 2, seryja fizika-tjechnichnyh navuk, s.92-99.
3. Naprasnikov V.V., Krasnovskaja S.V. Vlijanie uproshhajushhih predpolozhenij v konechno-jelementnyh modeljah kompressorno-kondensatornyh agregatov na spektr sobstvennyh chastot. Zhurnal "Sistemnyj analiz i prikladnaja matematika", 2014, № 1-3, s.51-55.
4. Borodulja A.V., Kunkevich D.P., Naprasnikov V.V., Polozkov Ju.V. APDL-modelirovanie jacheistykh konstruktivnykh jelementov detalej dlja additivnogo formoobrazovanija. Materialy NTK "Additivnye tehnologii, materialy i konstrukcii", Grodno, 5-6 oktjabrja, 2016, s.146-152.
5. Naprasnikov V.V., Kovaleva I.L., Polozkov Y.V., Kunkevich D.P., Borodulya A.V. Finite-element model of a sole with the using of cellular objects. «System analysis and applied information science». 2023;(2):24-30. (In Russ.) DOI: 10.21122/2309-4923-2023-2-24-30
6. Naprasnikov V.V., Wang Z., Kovaleva I.L., Novikov S.N. Using SpaceClaim scripts to create training models. «System analysis and applied information science». 2023;(3):60-64. (In Russ.). DOI: 10.21122/2309-4923-2023-3-60-64
7. Kovaleva I.L., Kunkevich D.P., Naprasnikov V.V., Polozkov Y.V., Chvankov A.A. Topological optimization of constructive solid geometry of lightweight structures. «System analysis and applied information science». 2022;(3):50-55. (In Russ.). DOI: 10.21122/2309-4923-2022-3-50-55

NAPRASNIKOV V.V., BORODULYA A.V., POLOZKOV J.V., KUNKEVICH D.P., WAN TZU ZHUI

MODAL ANALYSIS OF PLATE-LIKE CELLULAR OBJECTS WITH PERIODIC STRUCTURE

*Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus*

The method used to calculate natural frequencies and vibration shapes is described. Code fragments for construction for some types of filler are presented. The obtained frequencies and shapes of natural vibrations for three types of filler on the example of one construction are given.

Keywords: cellular objects, energy distribution at natural vibrations



Напрасников Владимир Владимирович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Программное обеспечения информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы – конечно-элементное моделирование, компьютерные средства инженерного анализа технических систем.

Naprasnikov Vladimir Vladimirovich, PhD, associate Professor of the Software Department of the Belarusian National Technical University. His research interest focus on finit-element computer aided engineering.

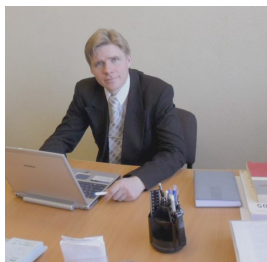
E-mail: n_v_v@tut.by



Бородуля Алексей Валентинович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Программное обеспечения информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы – CALS – технологии.

Borodulya Aleksei, PhD, associate Professor of the Software for Information technologies and systems Department of the Belarusian National Technical University. His research interest focus on CALS-technologies.

E-mail: alexius_@msn.com



Полозков Юрий Владимирович, доцент, кандидат технических наук, заведующий кафедрой «Программное обеспечение информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы – автоматизация проектирования объектов и процессов аддитивного производства, оцифровка описаний поверхностей объектов, информационные технологии в образовании.

Polozkov Yuriy Vladimirovich, PhD, head of the Department of Software for Information technologies and systems of the Belarusian National Technical University. His research interest focus on computer aided design and engineering of the objects of additive production, surfaces digitization, information technologies in the education.

E-mail: polozkov_yury@mail.ru



Кункевич Дмитрий Петрович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Программное обеспечение информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы – автоматизация конструкторско-технологического проектирования и инженерного анализа механических систем.

Kunkevich Dmitry, PhD, associate Professor of the Software Department of the Belarusian National Technical University. His research interest focus on computer aided design and engineering of mechanical systems.

E-mail: kunkevichd@gmail.com



Ван Цзы Жуй, аспирант кафедры «Программное обеспечение информационных систем и технологий» БНТУ. Научные интересы - конечно-элементное моделирование, компьютерные средства инженерного анализа технических систем.

Wang Zirui, postgraduate student of the department "Software for information systems and technologies" at BNTU. Scientific interests - finite element modeling, computer aids for engineering analysis of technical systems.

E-mail: 610958034@qq.com

**УПРАВЛЕНИЕ
ТЕХНИЧЕСКИМИ
ОБЪЕКТАМИ**

**MANAGEMENT
OF TECHNICAL
OBJECTS**

СИДОРЕНКО А.В., СОЛОДУХО Н.А.

АЛГОРИТМ ОГИБАНИЯ ПРЕПЯТСТВИЙ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ МОБИЛЬНОГО РОБОТА

Факультет радиофизики и компьютерных технологий
Белорусского государственного университета
г. Минск, Республика Беларусь

Предложен алгоритм и разработана компьютерная программа для моделирования огибания препятствий роботизированной системой. Для расширения возможностей перемещений роботизированной системой алгоритм совмещает основные элементы алгоритма *vfh* и разработанного нами ранее алгоритма I [1] и позиционируется в данной работе как алгоритм II. Проведена оценка среднего времени огибания препятствий различного типа, включая пять препятствий кубического типа, препятствие в виде длинной стены и сложное препятствие. В процессе вычислительного эксперимента с использованием симуляционного пространства Gazebo 11 рассчитаны временные параметры перемещения роботом препятствий различного типа, включая пять препятствий кубического типа, препятствие в виде стены и сложное препятствие. В процесс вычислительного эксперимента проведена статистическая обработка полученных результатов. Показано, что при использовании предложенного алгоритма оценка среднего времени огибания препятствий роботизированной системой снижается в отдельных случаях в 7,2 раза по сравнению с использованием алгоритма I.

Ключевые слова: робот, перемещение, препятствия, ROS 2, Gazebo 11

Введение

С учетом недавних достижений в области искусственного интеллекта и развития беспилотных летательных аппаратов при перемещении в двумерном и трехмерном пространствах, возникает задача обхода препятствий для роботизированных систем.

В работе [1], где реализован наш алгоритм I для обхода препятствий, несмотря на отсутствие методов машинного обучения, что могло бы замедлить процесс и увеличить вычислительную нагрузку, движение робота осуществляется не по кратчайшему маршруту. Алгоритм *vfh*, описанный в работе [2], демонстрирует оптимальные траектории при обходе множества препятствий. Тем не менее, его эффективность снижается, когда речь идет о длинных препятствиях, расположенных перпендикулярно траектории робота на пути к цели. В таких случаях алгоритм может сталкиваться с трудностями в планировании обхода, что приводит к необходимости использования дополнительных стратегий или модификаций алгоритма для более успешного маневрирования вокруг подобных препятствий.

В данной работе мы предлагаем новый алгоритм II, в котором мы интегрировали алгоритм *vfh* и алгоритм I. Такая комбинация позволяет использовать сильные стороны обоих подходов: алгоритм *vfh* обеспечивает быструю реакцию на изменения в окружающей среде и эффективное обхождение препятствий, в то время как алгоритм I отвечает

за более безопасное и адаптивное маневрирование. Это сочетание позволит роботу не только находить оптимальные маршруты, но и эффективно справляться с длинными и сложными препятствиями, которые могут встречаться на его пути. Объединенный алгоритм II нацелен на улучшение общей производительности навигации и адаптацию к динамическим условиям окружающей среды. Изначально робот начинает движение, применяя алгоритм *vfh*. При наличии в процессе перемещения робота длинного препятствия, расположенного перпендикулярно цели движения робота, в компьютерной программе, описывающей алгоритм, происходит переключение на использование алгоритма I. Работа является продолжением работы, представленной в [1, 3].

Проведение вычислительного эксперимента

Программно реализованные алгоритмы, использованные в нашей разработанной модели управления системой мобильных роботов, сделали возможным проведение вычислительного эксперимента с помощью созданной компьютерной программы.

Структурная схема предложенного нами алгоритма приведена на рисунке 1.

При работе с симуляцией движения робота использовался визуализатор Gazebo 11 и ROS 2 Humble Hawksbill. Для управления роботом применялись команды командной оболочки UNIX bash в ОС Linux Ubuntu 22.04 Jammy Jellyfish. Исходный код представлен в [4] в ветке “*vfh-modified-by-mikkita*”.

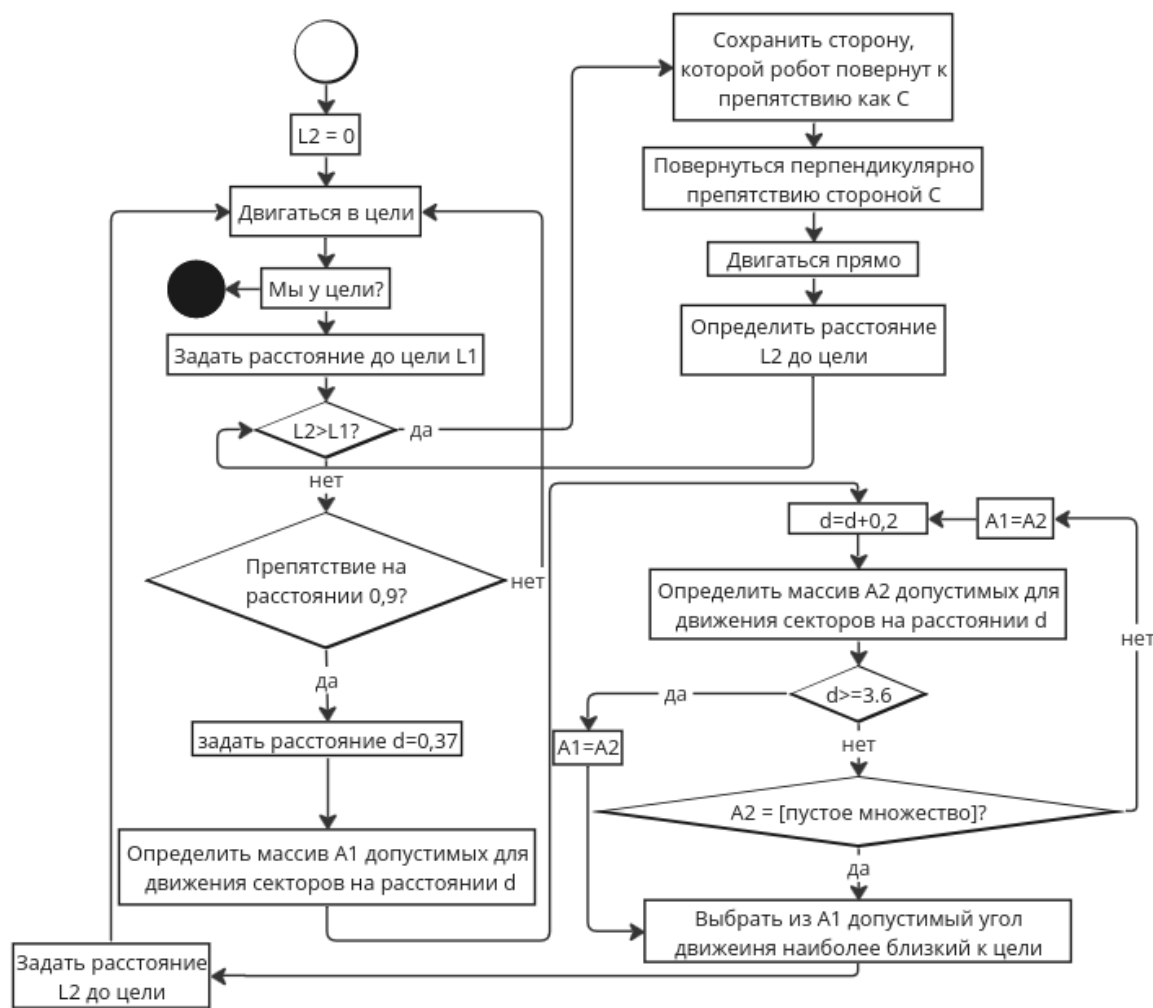


Рисунок 1. Структурная схема предложенного алгоритма II

Для работы алгоритма следует запустить скрипт `bash lines.sh`. Для задания конечной точки движения необходимо задать координаты X и Y (переменная “targetX” и переменная “targetY”, соответственно) в строках 3-16 файла `lines.sh`.

Модификация алгоритма для огибания препятствий

При моделировании системы перемещения робота в качестве среды была использована симуляционная поверхность размером 20 на 20 клеток, на которой размещены различные препятствия: одно препятствие кубического типа (рисунок 2а); два препятствия кубического типа (рисунок 2б); три препятствия кубического типа (рисунок 2в); четыре препятствия кубического типа (рисунок 2г); пять препятствий кубического типа (рисунок 2д); препятствие в виде длинной стены (рисунок 2е); сложное препятствие (рисунок 2ж). Стартовая точка при описании движения препятствий кубического типа в координатах (-2,0), конечная точка имеет координаты (9,0). Применение длинной стены и

сложного препятствия имеет при расчетах координаты стартовой точки (-3,5) и (-3,5), соответственно, а координаты конечной точки составляют: (4,3) и (4,3).

Алгоритм `vfh` основывается на определении свободного сектора, в котором нет препятствий на требуемом расстоянии и который максимально близок к цели. Используя данные со встроенных датчиков робота, выбирается такое направление движения, чтобы избежать столкновений с задетектированными препятствиями и при этом двигаться, приближаясь к цели.

Далее мы более подробно рассмотрим работу алгоритма `vfh` применительно к нашей программе. Этот алгоритм позволяет роботу эффективно обходить препятствия, анализируя окружение и выбирая оптимальные направления для движения. Мы обсудим ключевые аспекты реализации алгоритма, его параметры, а также способы адаптации к различным условиям окружающей среды. Когда робот начинает движение и его расположение приближается к препятствию на расстояние около 0,89 единицы координатной сетки, запускается цикл оценки доступных для движения секторов. В рамках этого

цикла происходит анализ окружающей среды, где каждый сектор оценки находит свое соответствие с данными о препятствиях. Робот оценивает, какие направления являются безопасными для движения и выбирает наиболее подходящий сектор для дальнейшего перемещения. Этот процесс происходит, когда расстояние до препятствия составляет 0,89 единицы координатной сетки. На данном этапе робот анализирует данные о расположении препятствий, определяя, какие сектора доступны для движения. Путем оценки расстояний и углов к каждому сектору, робот может с точностью определить наиболее безопасные и оптимальные направления для дальнейшего перемещения, минимизируя риск столкновения. Запуск цикла оценки доступных секторов осуществляется поэтапно. В каждой итерации расстояние, на котором проводится оценка, увеличивается на 0,2 единицы координатной сетки. Это позволяет роботу постепенно расширять область анализа, начиная с ближайших секторов и постепенно включая более дальние. Такой подход обеспечивает более детальное изучение окружающей среды и улуч-

шает способность робота точно определить безопасные направления для движения, особенно в сложных и динамичных ситуациях. Если в ходе работы цикла оценки доступных секторов наступает момент, когда нет доступных направлений для движения – что может часто происходить в замкнутых пространствах с поворотами и ограничениями – робот возвращается к результату предыдущей итерации оценки. В этом случае он выбирает направление, которое было наиболее безопасным и близким к цели. Это позволяет роботу избежать застревания и продолжить движение к более открытому пространству, что особенно важно для обеспечения беспрепятственного передвижения в сложной обстановке. Если в процессе работы цикла расстояние до препятствия достигает или превышает дальность его обнаружения, равную 3,5999 единицы координатной сетки, то робот выбирает направление движения, которое совпадает с направлением к заранее заданной цели. Это позволяет ему максимально эффективно направляться к цели, несмотря на наличие либо отсутствие препятствий.

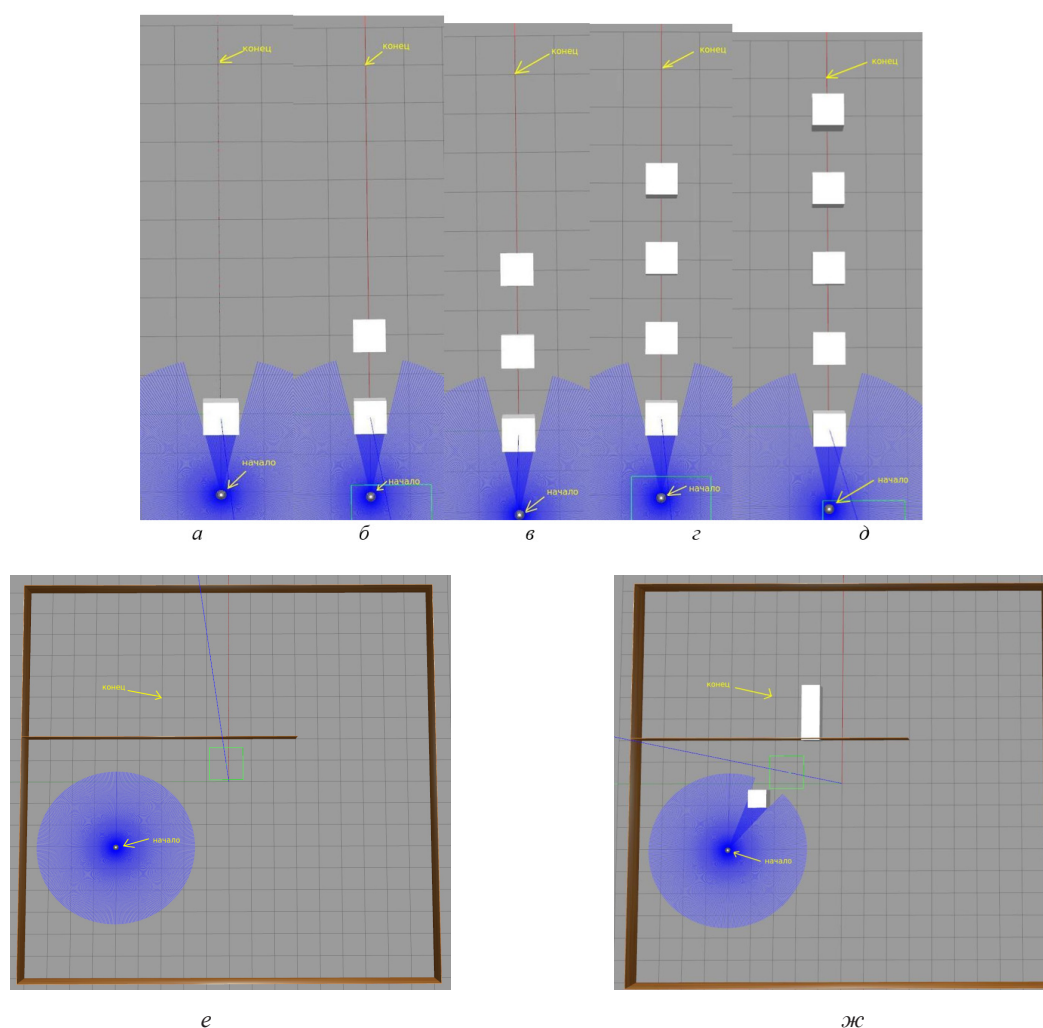


Рисунок 2. Симуляционное пространство в пакете визуализации Gazebo 11 с разными вариантами препятствий: кубического типа: а – одно препятствие, б – два препятствия, в – три препятствия, г – четыре препятствия, д – пять препятствий, а также: е – препятствие в виде длинной стены, ж – сложное препятствие

В алгоритме vfh роботы могут адаптировать свои действия в ответ на изменения в окружении. Когда робот движется вдоль препятствия и начинает удаляться от заданной цели, он перенастраивает своё направление движения. Вместо продолжения движения вдоль препятствия в том же направлении, робот выбирает изменить курс и начать двигаться вдоль препятствия в другую сторону. Модификация алгоритма vfh сосредоточена в том моменте, когда робот находится близко от препятствия и двигается вдоль него. В какой-то момент времени робот начинает удаляться от цели. Мы совмещаем алгоритм I с алгоритмом vfh, и, когда робот начинает отходить от цели, активируем алгоритм I, который заставляет робота продолжать движение выбранным направлением вдоль препятствия, пока он не приблизится к цели, обходя препятствие и двигаясь близко к нему. Когда робот сталкивается с препятствием (т.е. когда расстояние до него не превышает 0,88 единицы координатной сетки), он разворачивается в сторону препятствия, которая была первоначально выбрана, и начинает двигаться вдоль него по прямой. Это продолжается до тех пор, пока изгиб препятствия не позволит ему отдалиться от препятствия на 0,96 единицы координатной сетки. Затем робот поворачивается на 90 градусов в сторону препятствия и продолжает движение до тех пор, пока не отдалится на расстояние 0,96 единиц координатной сетки или не встретит новое препятствие (то есть не приблизится на расстояние менее 0,88 единиц координатной сетки). Если робот успешно отдалился на расстояние 0,96 единиц координатной сетки, он снова поворачивается на 90 градусов в том же направлении, в котором двигался ранее. Затем он продолжает движение в этом направлении, ожидая дальнейших препятствий или изменений в окружении. Как только робот зафиксирует приближение к цели при движении, он переключается обратно на алгоритм vfh. Это позволяет ему снова сосредоточиться на навигации к цели, учитывая окружающую обстановку и избегая препятствий на своем пути.

Анализ результатов вычислительного эксперимента

Результаты в виде временных характеристик (времени огибания) препятствий различного типа для алгоритмов I и II, приведены на рисунке 3. В процессе вычислительного эксперимента проводилась статистическая обработка полученных результатов. Для подтверждения эффективности предложенного алгоритма было проведено 10 экспериментов для каждого типа препятствий, по результатам которых рассчитывалось среднее время огибания каждого типа препятствий для алгоритмов I и II, погрешность определялась с использованием коэффициента Стьюдента с доверительной вероятностью $p = 0,95$.

При огибании одного кубического препятствия (рисунок 3) при использовании алгоритма II время оказалось в 2,5 раза меньше чем при использовании алгоритма I. Огибание двух кубических препятствий (рисунок 3) происходило в 3,7 раза быстрее чем в случае алгоритма I. Огибание трех кубических препятствий позволило ускорить процесс огибания в 5, 4 раза относительно времени при использовании алгоритма I.

Среднее время огибания препятствия, минут

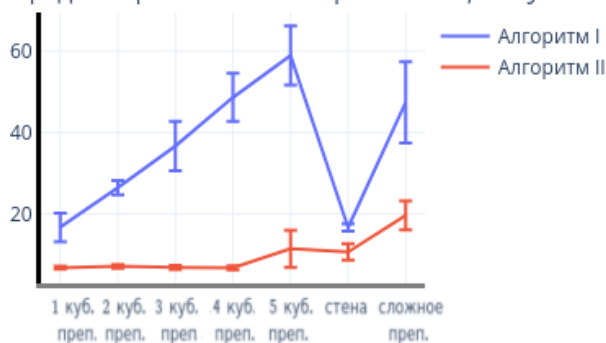


Рисунок 3. Графики зависимости оценки среднего времени огибания препятствий различного типа для алгоритма I и алгоритма II

При огибании групп из четырех и пяти кубических препятствий, длинной стены и сложного препятствия время огибания существенно снизилось при использовании алгоритма II: в 7,2 раза, в 5,2 раза, на 57 % и в 2,4 раза.

Заключение

В данной работе нами предложен алгоритм II огибания препятствий роботизированной системой, в котором отсутствует алгоритм машинного обучения. Проведена оценка времени движения до цели с огибанием препятствий в пространстве визуализации Gazebo II.

Проведен вычислительный эксперимент по огибанию различного вида препятствий: кубического типа, а также препятствия в виде длинной стены, сложного препятствия с применением данного алгоритма. Выявлено, что с использованием алгоритма II движение робота до цели без столкновения с препятствием происходит быстрее, чем при использовании алгоритма I.

При использовании предложенного алгоритма II для каждого из рассмотренных в модели препятствий приводится пример движения робота в виде записанного видео. Видео размещено на сайте You Tube [5].

Верификация предложенного нами алгоритма II огибания препятствий при перемещении мобильного робота позволила установить преимущества по временным параметрам при сравнительном анализе с алгоритмом, приведенном в работе [1].

ЛИТЕРАТУРА

1. **Сидоренко, А.В.** Огибание препятствий при перемещении мобильного робота / А.В. Сидоренко, Н.А. Солодухо // Системный анализ и прикладная информатика. – 2023. – № 1. – С. 4-9.
2. **Ulrich, I.** VFH*: Local Obstacle Avoidance with Look-Ahead Verification / I. Ulrich, J. Borenstein // Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, CA, San Francisco, 2000. – Pp. 2505-2511.
3. **Сидоренко, А.В.** Алгоритм для огибания препятствий при движении мобильного робота / А.В. Сидоренко, Н.А. Солодухо // Компьютерные технологии и анализ данных (CTDA'2024) : материалы IV Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 25-26 апр. 2024 г. / БГУ; редкол.: В. В. Скакун (гл. ред.), Н.Н. Яцков, В.В. Гринёв. – Минск : БГУ, 2024. – С. 122-125.
4. **GitHub** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://github.com/MikitaSaladukha/ROSproject> – Дата доступа: 11.03.2024.
5. **YouTube** [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://youtube.com/playlist?list=PLU4iF0_W9xOks7JPA_BAWjbfVECA8PgO4&si=GrTnC6w58-Rpeu8w – Дата доступа: 07.05.2024.

REFERENCES

1. **Sidorenko A.V., Saladukha N.A.** Bending obstacles when moving a mobile robot. System Analysis And Applied Information Science. 2023. № 1, pp. 4-9.
2. **Ulrich I., Borenstein J.** VFH*: Local Obstacle Avoidance with Look-Ahead Verification. Proceedings of the 2000 IEEE International Conference on Robotics & Automation, San Francisco, CA, San Francisco, 2000, pp. 2505-2511.
3. **Sidorenko, A.V., Saladukha N.A.** Algoritm dlya ogibaniya prepyatstvij pri dvizhenii mobil'nogo robota. Komp'yuternye tekhnologii i analiz dannyh (CTDA'2024) : materialy IV Mezhdunar. nauch.-prakt. konf., Minsk, 25–26 apr. 2024. / Belarus. gos. un-t ; redkol.: V. V. Skakun (gl. red.), N.N. Yackov, V.V. Grinyov. – Minsk : BGU, 2024.– Pp. 122-125.
4. **GitHub** [Electronic resource]. Mode of access: <https://github.com/MikitaSaladukha/ROSproject>. Date of access: 11.03.2024.
5. **YouTube** [Electronic resource]. – Mode of access: https://youtube.com/playlist?list=PLU4iF0_W9xOks7JPA_BAWjbfVECA8PgO4&si=GrTnC6w58-Rpeu8w – Date of access: 07.05.2024

SIDORENKO A.V., SALADUKHA N.A.

OBSTACLE AVOIDANCE ALGORITHM IN MOBILE ROBOT MOTION

Belarusian State University
Minsk, Republic of Belarus

A method has been proposed, and a computer program has been developed for simulating obstacle avoidance by a robotic system. To expand the mobility capabilities of the robotic system, the algorithm combines the core elements of the vfh algorithm and our previously developed algorithm I [1], and is positioned in this work as algorithm II. An evaluation of the average obstacle avoidance time for various types of obstacles has been conducted, including five cubic obstacles, a long wall obstacle, and a complex obstacle. During the computational experiment using the Gazebo 11 simulation environment, the time parameters for robot movements around various types of obstacles were calculated, including five cubic obstacles, a wall obstacle, and a complex obstacle. In the computational experiment, statistical processing of the obtained results was carried out. It was shown that using the proposed algorithm, the assessment of the average time for the robotic system to avoid obstacles is reduced in some cases by up to 7.2 times compared to the use of algorithm I.

Keywords: robot, movement, obstacles, ROS 2, Gazebo 11



Сидоренко А.В., профессор факультета радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета, доктор технических наук.

E-mail: sidorenkoa@yandex.by



Солодухо Н.А., старший преподаватель факультета радиофизики и компьютерных технологий Белорусского государственного университета, магистр физико-математических наук.

ORTIQOV Z.U.

PROBLEMS OF THE PROCESS OF MOISTENING RAW COTTON AND COTTON FIBER. COTTON FIBER WETTING PROCESS PROBLEMS

*Computer Engineering Department of Andijan State University
Andijan, Republic of Uzbekistan*

The moistening of raw cotton and cotton fiber is a critical stage in the textile production process, significantly influencing the quality of the final product. However, achieving optimal moisture content presents numerous challenges. One of the primary problems is the uneven distribution of moisture during processing, which can lead to variations in fiber strength and quality. The inappropriate application of water or humidification methods often causes fiber shrinkage, reduced durability, and increased contamination. Furthermore, the control of temperature and humidity plays a vital role in preventing over-drying or excessive moisture retention, both of which can negatively affect the spinning and handling properties of cotton fibers. Technological limitations, coupled with the complexity of monitoring moisture levels accurately, result in inefficiencies in the cotton processing industry. Research has also shown that improper moisture regulation can lead to decreased efficiency in machinery, increased energy consumption, and a higher likelihood of fiber damage during transportation and storage. Therefore, addressing these issues requires advancements in moisture control technologies and the development of standardized procedures to ensure consistent and high-quality cotton fiber production.

Keywords: *moisture content, raw cotton processing, fiber quality, cotton moisture absorption, humidification techniques, drying process, moisture distribution, fiber strength, cotton fiber properties, temperature control, moisture regain, cotton handling, humidity regulation, processing efficiency, fiber shrinkage, cotton lint quality, wetting agents, moisture monitoring, cotton conditioning, moisture control systems*

Introduction

The process of moistening raw cotton and cotton fiber is a crucial operation in textile manufacturing, directly impacting fiber quality, processing efficiency, and the overall performance of cotton products. Cotton, as a natural fiber, is highly sensitive to moisture variations, which can significantly affect its mechanical properties such as strength, flexibility, and durability. Proper moisture regulation is essential to maintain the fiber's natural characteristics and to optimize its performance during spinning, weaving, and subsequent textile processes. However, this process is fraught with numerous challenges.

Achieving uniform moisture distribution across cotton fibers is difficult due to the heterogeneous nature of raw cotton, which varies in its ability to absorb and retain moisture. Inconsistent moisture levels can lead to fiber degradation, shrinkage, and compromised yarn quality. Additionally, improper wetting methods or excess moisture may promote microbial growth, cause fiber swelling, and damage machinery, ultimately reducing production efficiency.

This introduction sets the stage for an in-depth examination of the key challenges and technological limitations associated with the moistening of raw cotton and fiber. By addressing these issues, the textile industry can enhance fiber quality and improve overall production outcomes.

The complexities of controlling moisture levels stem not only from the nature of cotton but also

from the diverse environmental factors that influence the process. Variations in ambient temperature and humidity, combined with the physical characteristics of the cotton itself, create a dynamic and unpredictable environment for moisture control. Inadequate monitoring systems often result in inconsistent moisture application, leading to fiber damage or incomplete conditioning, which further affects the downstream processing steps such as carding, spinning, and weaving.

Furthermore, the traditional techniques of cotton moistening, while still widely used, often fall short in meeting the modern requirements of precision and consistency. Advanced technological solutions, such as automated moisture control systems and improved humidification techniques, have been developed but remain underutilized or costly to implement. These technologies hold the potential to minimize energy consumption, reduce waste, and improve the overall efficiency of the cotton manufacturing process.

Understanding and addressing the problems associated with cotton moistening are essential not only for enhancing the quality of cotton products but also for ensuring sustainability in the textile industry. This study aims to explore the specific challenges involved in the wetting process of raw cotton and fiber, evaluate the effectiveness of current technologies, and propose solutions for improving moisture control in cotton processing.

Methods

To address the challenges associated with the moistening of raw cotton and cotton fiber, several methods can be employed, each focusing on improving moisture control, distribution, and fiber quality. The following approaches outline both traditional and advanced methods used to enhance the moistening process.

Moisture Content Measurement

1. **Gravimetric Method:** A traditional technique where cotton samples are weighed before and after drying to determine the moisture content. Though accurate, this method is time-consuming and not suitable for real-time monitoring in large-scale operations.

2. **Capacitive and Resistive Sensors:** These sensors provide continuous, real-time monitoring of moisture levels by measuring changes in capacitance or resistance as moisture content fluctuates. They are widely used in modern cotton processing plants to ensure consistent moisture control.

Humidification Systems

1. **Spray Humidification:** The use of fine water mist to moisten raw cotton. This method is cost-effective but often leads to uneven moisture distribution, requiring improvements in spray nozzle design and placement.

2. **Steam Humidification:** Steam is used to condition cotton fibers more uniformly. This method is more effective in penetrating dense cotton layers and minimizing fiber shrinkage. However, excessive use of steam may cause over-saturation or increase energy consumption.

3. **Evaporative Humidification:** This involves adding moisture through air saturated with water vapor. It offers a gentler humidification process but may not always provide adequate moisture in low-humidity environments.

Moisture Distribution Optimization

1. **Moisture Equalization Chambers:** After moistening, cotton is passed through a chamber designed to evenly distribute moisture across the fiber mass. This reduces the risk of fiber degradation due to uneven wetting.

2. **Controlled Environmental Chambers:** These chambers are equipped with precise temperature and humidity controls to condition cotton under consistent environmental conditions, reducing variability in moisture content across different batches of cotton.

Advanced Moistening Technologies

1. **Ultrasonic Humidification:** Ultrasonic waves generate fine mist droplets, offering a more precise and energy-efficient method of moistening cotton fibers. This technique improves uniformity and reduces water

usage, making it a promising solution for modern cotton processing.

2. **Infrared Moisture Sensors:** These sensors detect the moisture content of cotton in real time by measuring the absorption of infrared light. They are highly effective in monitoring and adjusting the moisture levels during processing.

3. **Microwave-Based Moisture Control:** Microwave technology can be used to heat and moisten fibers from the inside, ensuring even distribution of moisture throughout the fiber. This method offers enhanced accuracy and efficiency but requires significant investment in equipment.

Moisture Control Algorithms

1. **Automated Feedback Systems:** Advanced moisture control algorithms use real-time sensor data to adjust the humidification process automatically. These systems help optimize moisture levels, reduce human error, and improve the overall efficiency of cotton processing.

2. **Predictive Maintenance:** By using data analytics and machine learning, predictive models can forecast moisture-related problems and suggest preventive measures to avoid fiber damage or quality degradation.

Drying and Re-wetting Cycles

1. **Sequential Moistening:** Instead of a single wetting phase, cotton can undergo multiple cycles of drying and re-wetting to achieve more uniform moisture levels. This method is particularly useful for cotton with highly variable initial moisture content.

2. **Conditioned Re-wetting:** In this method, cotton is conditioned with a small amount of moisture before being exposed to more significant humidification. This helps prevent fiber swelling and damage by ensuring gradual and controlled moisture absorption.

Mechanical Methods

1. **Roller Moistening Systems:** Cotton fibers are passed through rollers equipped with moisture application systems, allowing for precise control over how much moisture is added. This method provides uniformity but requires careful calibration to avoid fiber compression or damage.

2. **Aerodynamic Moistening:** This method involves passing cotton through a chamber where moisture-laden air is blown through the fibers. It offers uniform moisture distribution but requires high energy input and advanced airflow control mechanisms.

By implementing these methods, cotton processors can mitigate the problems associated with raw cotton and cotton fiber moistening, ensuring higher quality fibers, reduced waste, and more efficient production processes. These approaches also contribute to lowering energy consumption and reducing the environmental impact of cotton processing.

Results

Moisture control is essential at various stages of cotton processing, including ginning, spinning, and weaving. Inadequate moisture levels can lead to fiber brittleness, reduced tensile strength, and poor spinning performance. Conversely, excessive moisture can result in fiber swelling, microbial growth, and machine malfunctions. Thus, maintaining an optimal moisture range is necessary for producing high-quality cotton products and avoiding costly operational disruptions.

Traditional moisture control methods, such as manual monitoring or the use of basic humidification systems, are often inefficient and inconsistent. These methods rely on fixed settings or periodic sampling, which do not account for dynamic changes in environmental conditions or cotton fiber variability. As a result, these methods often fail to maintain ideal moisture levels throughout the processing line. Moisture control algorithms address this gap by providing continuous, real-time monitoring and adjustment capabilities, leading to better control over fiber moisture content.

Moisture Control Algorithms: How They Work

Moisture control algorithms are advanced software systems designed to automatically regulate moisture levels in cotton processing. They utilize data from a network of sensors, such as infrared or capacitive moisture sensors, which continuously monitor the moisture content of cotton fibers as they move through various stages of production. These algorithms process the sensor data, using pre-programmed thresholds to maintain the moisture levels within the desired range.

The core functionality of moisture control algorithms can be broken down into several components:

1. Real-Time Monitoring: Sensors installed throughout the processing line provide continuous feedback on moisture levels, allowing for real-time adjustments. These sensors detect changes in moisture content as cotton fibers absorb or release moisture during processing.

2. Automated Feedback Loops: Based on sensor data, the algorithm automatically adjusts the humidification system, ensuring that moisture is applied or removed as needed. This reduces the need for manual interventions and ensures more precise control over fiber moisture.

3. Predictive Moisture Management: Some moisture control algorithms use machine learning models to predict moisture fluctuations based on historical data and environmental conditions, such as temperature and humidity. This predictive capability allows the system to make proactive adjustments, preventing fiber damage before it occurs.

4. Process Optimization: By maintaining consistent moisture levels, moisture control algorithms help optimize the cotton processing workflow. This leads to fewer production stoppages, reduced fiber waste, and improved energy efficiency, as the system can avoid over-humidification or over-drying.

Key Benefits of Moisture Control Algorithms

1. Improved Fiber Quality: One of the most significant benefits of moisture control algorithms is the ability to maintain consistent fiber quality. By ensuring that cotton fibers remain within the optimal moisture range, the risk of fiber brittleness, shrinkage, or microbial contamination is minimized. This leads to higher-quality yarns and fabrics, with better tensile strength, flexibility, and durability.

2. Increased Production Efficiency: Automated moisture control eliminates the need for manual monitoring and adjustment, reducing labor costs and the risk of human error. The real-time monitoring and feedback mechanisms provided by moisture control algorithms also reduce production downtime caused by moisture-related issues. This increased efficiency translates into higher throughput and better overall production output.

3. Energy and Cost Savings: By maintaining optimal moisture levels, moisture control algorithms reduce the energy consumption associated with over-humidification or over-drying. This leads to lower utility costs and contributes to a more sustainable production process. Additionally, the reduction in fiber waste and machine maintenance costs further improves the cost-effectiveness of cotton processing.

4. Scalability and Flexibility: Moisture control algorithms can be integrated into a wide range of cotton processing environments, from small-scale ginning operations to large textile manufacturing plants. Their flexibility allows them to be customized based on the specific requirements of each production line, making them suitable for both traditional and modern cotton processing setups.

Moisture control algorithms represent a significant advancement in cotton processing, offering improved fiber quality, enhanced production efficiency, and substantial cost savings. By providing real-time monitoring, automated feedback, and predictive capabilities, these algorithms address many of the moisture-related problems that have long plagued the cotton industry. While challenges remain, particularly in terms of cost and infrastructure, the future of moisture control algorithms is promising. As technology continues to evolve, these systems will play an increasingly critical role in modernizing cotton processing and ensuring the production of high-quality textiles in a sustainable and efficient manner.

The system works according to the algorithm presented in Figure 1. The fiber moisture indicator is determined by the moisture sensor and information is transmitted to the system. If there is enough moisture, the process continues and the fiber is pressed and sent to storage. If there is not enough moisture, in stage 1, the nozzles of stage 2 will be fully activated first.

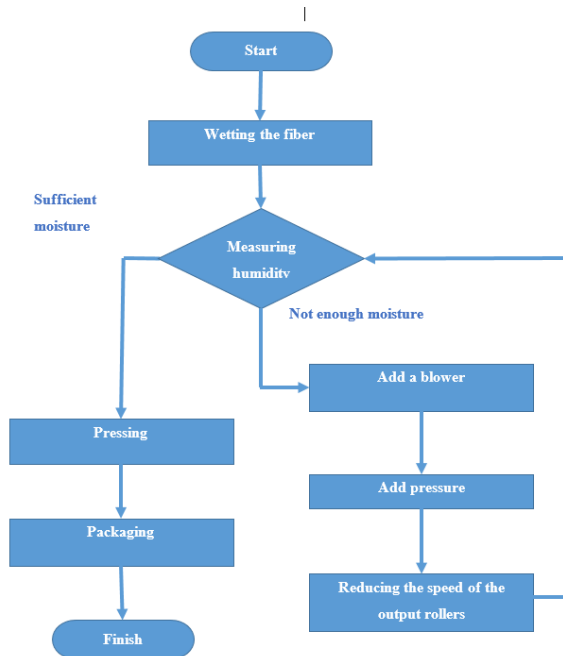


Figure 1. Fiber moisture control and management algorithm

When the humidity reaches the condition, the pressing of the fiber continues. If it is low, the system goes to the next step of amplification: the steam pressure is increased to 500 Pa. When the humidity reaches the condition, the pressing of the fiber continues. If it is less, the system goes to the next step of strengthening: the speed of the output rollers, that is, the speed at which the willow leaves the humidifier is reduced.

In the preliminary studies, it was found that the first and second stages of moistening are sufficient for additional moistening of 2-2.5 %. Only when the fiber moisture content is 3 % or less, it is necessary to move to the last stage.

In this method of moistening, heating of the lower part of the condenser is provided, which facilitates the effective penetration of moisture into the fiber mass and excludes steam condensation. Thus, the installation of the proposed humidification device helps to increase the moisture content of the cotton fiber. In this regard, further studies of the wetting process using this construction were conducted.

After the soaking process, the fibers were packed in bales of up to 220 kg in DA 8237 press equipment, and samples were taken from them in the prescribed manner.

Experiments have shown that fibers of different origin and maturity have different sorption properties.

When studying the moisture absorption (sorption) properties of cotton, it has different moisture content under the same natural conditions.

The tensometric method was used to study the sorption properties of cotton fiber. Observations were made over a long period of time. Humidity was measured once a week under constant conditions.

The ability of water molecules to connect with the fiber mass also depends on the change in the properties of the fiber during moisture absorption. The curve obtained as a result of the study (Figure 2) describes the moisture absorption of the fiber in the equilibrium state at different relative humidity of the ambient air.

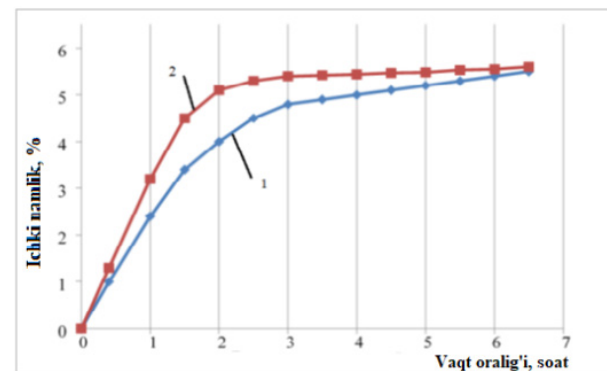


Figure 2. Absorption of moisture of different contents by fibers

If the value of humidity is below 15%, chemical bonding between water molecules and cotton occurs, and if it is 40-90%, adsorption bonding is manifested. When ϕ = above 90%, moisture is absorbed by the fiber due to capillary forces. This conclusion was made on the basis of studying the electrical conductivity of one fiber using a steam meter and measuring its cross-sectional area.

A sharp change in indicators is observed at values of ϕ = 15.4 % and 90 %. However, the chemical composition and structure of the fiber indicate that all forms of contact with moisture can occur simultaneously. Such curves obtained from other studies are presented in Figure 2.3. As a result of the conducted studies, it is confirmed that the curves obtained by E.N. Chernov are correct. [5; p. 18] Sorption of water vapor by fiber was studied both in vacuum and at atmospheric pressure. For this, a high-vacuum device with a sorption balance with quartz spirals of the McBen balance type was used. The studies were conducted at a temperature of 25 °C at a relative humidity of 0 to 92 %.

A characteristic feature of the moisture absorption curves is that when the relative humidity of the air is 90-95 %, the humidity of the fiber does not exceed 16 %. Above, the hygroscopic humidity of the fiber, that is, the equilibrium humidity at relative air humidity ϕ = 100 %. Further absorption of moisture can occur only in direct contact of the product with a liquid environment.

Discussion

The moistening of raw cotton and cotton fiber is a critical process in the textile industry, directly influencing fiber quality, machine performance, and production efficiency. Historically, traditional methods of moisture control have been manual and prone to inefficiencies such as inconsistent moisture distribution, fiber damage, and increased energy consumption. With the advancement of technology, the introduction of Moisture Control Algorithms (MCAs) has emerged as a solution to many of these persistent issues. This discussion focuses on how MCAs address the key problems in the moistening process and their transformative impact on cotton processing.

1. Real-Time Moisture Monitoring and Consistency Improvement: One of the most significant challenges in the cotton moistening process is the uneven distribution of moisture across fibers, leading to quality degradation. Traditional methods, such as manual monitoring and spray humidification, often fail to provide uniform moisture levels, which can result in fiber brittleness, swelling, or excessive microbial growth.

Moisture Control Algorithms solve this problem by enabling real-time moisture monitoring. MCAs use sensor networks that constantly track moisture content in raw cotton and cotton fibers. Infrared, capacitive, or microwave sensors embedded in the production line measure the moisture content at various stages, providing continuous data feedback to the control system.

By processing this data, MCAs automatically adjust the humidification system, ensuring a uniform distribution of moisture throughout the fiber. This not only reduces moisture variability but also improves fiber quality by maintaining an optimal moisture level, eliminating the risks associated with both under- and over-moistening. Inconsistent moisture application—previously a major issue in cotton processing—has been significantly reduced through these automated systems.

2. Prevention of Fiber Damage: Excessive moisture leads to fiber damage, swelling, and weakening, which negatively affects the downstream processing of cotton. Over-moistening also causes mechanical malfunctions, which disrupt production and increase maintenance costs.

MCAs tackle this issue by integrating automated feedback loops that control the moisture application process with precision. The system can detect when the moisture content approaches the upper or lower thresholds and immediately adjust humidification rates to avoid excess. This automated control minimizes human intervention, reducing the risk of human error in setting moisture levels.

Furthermore, MCAs can be programmed to account for the variability in cotton fibers due to environmental changes such as ambient humidity and temperature. By adapting to these real-time fluctuations, MCAs prevent fiber degradation that typically arises from

improper moisture levels. This dynamic control ensures that fibers retain their integrity and strength throughout the processing stages, enhancing the overall quality of the final product.

3. Optimization of Energy Use and Reduction in Waste: Traditional moisture control systems are known for their inefficient use of resources, often over-humidifying or over-drying cotton, leading to wasted energy and water. In cotton processing plants, maintaining the balance between adequate moistening and efficient resource use is critical for economic sustainability.

The use of predictive models in MCAs is a game changer in optimizing energy consumption. By analyzing historical data and predicting moisture levels based on environmental factors, MCAs can forecast the necessary amount of humidification required at different stages of production. This predictive capability prevents overuse of humidification systems, reducing energy costs and improving the overall environmental sustainability of the process.

For instance, ultrasonic or evaporative humidification systems, controlled by MCAs, can be adjusted based on the real-time needs of the cotton fibers. These systems require significantly less energy compared to steam-based methods, which rely on higher energy inputs. Consequently, MCAs have led to more efficient and sustainable cotton production practices by reducing both water consumption and energy waste.

4. Improved Production Efficiency and Reduced Downtime: Production downtime due to moisture-related machine malfunctions or fiber inconsistencies is a frequent problem in cotton processing. Manual moisture control systems are often reactive, leading to delayed adjustments and prolonged production stoppages.

MCAs enhance production efficiency by providing automated, proactive adjustments. When moisture levels fluctuate unexpectedly, the system can react in real time, preventing potential machine malfunctions. This leads to fewer breakdowns and minimizes the need for manual interventions.

Additionally, MCAs can integrate with predictive maintenance systems, which foresee potential moisture-related problems before they escalate. This capability reduces downtime, as issues are addressed before they cause significant disruptions to production. The result is a smoother production process with fewer interruptions, contributing to higher throughput and better utilization of resources.

5. Scalability and Adaptability in Various Cotton Processing Environments: One of the most notable benefits of MCAs is their scalability and adaptability to different cotton processing environments. While advanced humidification techniques are often cost-prohibitive for smaller operations, MCAs offer a flexible solution that can be tailored to the specific needs of any production facility, regardless of its size.

For larger, industrial-scale operations, MCAs provide the advantage of seamless integration with existing production lines, offering comprehensive control over complex processes. For smaller, more traditional operations, the algorithm can be scaled down to meet their more basic requirements, providing precise moisture control without the need for significant infrastructure changes. This adaptability makes MCAs accessible to a wide range of cotton producers, helping them optimize their processes without the need for extensive capital investments.

6. Challenges in Implementation: While MCAs provide numerous benefits, several challenges persist. Initial costs for sensor networks, algorithmic systems, and integration with existing processing lines remain a significant barrier to adoption, particularly in regions with limited resources. Training personnel to operate and maintain these advanced systems is another hurdle, as many cotton processing facilities may lack the expertise needed to implement MCAs effectively.

Moreover, the precision of MCAs depends heavily on the quality of sensor data. In environments with high variability in fiber properties or external conditions, sensor accuracy may diminish, leading to less effective moisture control. To address these challenges, further innovation is required in the development of low-cost, robust sensor technologies, as well as user-friendly interfaces that can be easily integrated into existing processing infrastructures.

7. Future Prospects and Innovations: The future of MCAs in cotton processing is promising, with several avenues for innovation. Machine learning and artificial intelligence (AI) are poised to enhance the predictive capabilities of moisture control systems, enabling algorithms to learn from vast datasets and anticipate moisture fluctuations with even greater precision. This would further minimize fiber damage, reduce energy consumption, and optimize resource use.

Additionally, the integration of MCAs with the Industrial Internet of Things (IIoT) is likely to revolutionize cotton processing. By connecting sensor networks, humidification systems, and production line data to centralized control platforms, MCAs could enable more holistic and efficient management of the entire

cotton production process. The result would be a highly automated, self-optimizing system capable of responding dynamically to changes in both internal production parameters and external environmental conditions.

Conclusion

The application of Moisture Control Algorithms (MCAs) has transformed the way raw cotton and cotton fibers are moistened in the textile industry. Through real-time monitoring, automated feedback loops, and predictive capabilities, MCAs address many of the traditional challenges associated with the moistening process, including inconsistent moisture distribution, fiber damage, and inefficiencies in energy and resource use. While the implementation of MCAs comes with challenges, particularly in terms of cost and technical expertise, the potential benefits in terms of fiber quality, production efficiency, and sustainability are substantial. As technology continues to evolve, MCAs will play an increasingly important role in optimizing cotton processing for a more efficient and sustainable future.

The implementation of Moisture Control Algorithms (MCAs) has significantly improved the cotton processing industry by addressing key challenges such as uneven moisture distribution, fiber damage, and inefficient resource use. Through the use of real-time monitoring, automated feedback systems, and predictive models, MCAs ensure a more consistent and controlled moistening process. This results in improved fiber quality, optimized energy consumption, and enhanced production efficiency.

Despite their benefits, challenges such as high initial costs, the need for sensor accuracy, and operator training still exist. However, with the continuous evolution of machine learning and IoT integration, MCAs are expected to become even more effective, driving the future of cotton processing toward greater sustainability and efficiency.

In summary, MCAs represent a transformative approach to overcoming the longstanding problems of moistening raw cotton and cotton fibers, paving the way for innovation and higher-quality cotton products in the textile industry.

REFERENCES

1. **Kumar P.S., Joshiba, G.J.** This research covers the sustainability aspects of cotton spinning, focusing on challenges such as moisture control during fiber processing, which directly impacts fiber quality. *Sustainability in the Textile and Apparel Industries*. Springer. 2020. (SpringerLink)ps://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-38545-3_9
2. **Gonlugur M.E.** This study investigates the uneven distribution of moisture during cotton fiber wetting and its effects on fiber strength, elasticity, and overall quality during the spinning process. *Sustainable Production Methods in the Textile Industry*. InTechOpen. 2019. (SpringerLink)ps://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-38545-3_9
3. **Palamutcu S.** This research focuses on the effects of moisture content on the physical and mechanical properties of cotton fibers and how it influences spinning efficiency and yarn quality. *Sustainable Textile Technologies: Process and Product Innovations in the Cotton Industry*. 2017. (SpringerLink)ps://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-030-38545-3_9

4. **Ortiqov Z.U., Arrabbayev A.X.** Planning of multi-stage production systems with interchangeable equipment. *Academicia: An International Multidisciplinary Research Journal* <https://saarj.com> 2021. Vol. 11, Issue 1. – Pp. 410-417.
5. **Ortiqov Z.U.** Formation of cotton fiber structure. *ERB Genius journals* ISSN: 2795-7365 volum 18 march 2023. – Pp. 16-20.
6. **Ortiqov Z.U.** Influence of drying methods on the quality of cotton fiber”. *Innovative Technologica of Methodical research jurnal (ITMRJ)*. 2023. Vol. 4, Issue 3. – Pp. 1-12.
7. **Ortiqov Z.U., Sodiqov V.S.** Cotton industry in the period of independence. “Axborot-kommunikatsiya texnologiyalari va telekommunikatsiyalarning zamonaviy muammolari va yechimlari” mavzusidagi respublika ilmiy-texnik anjumaning ma’ruzalar to’plami Farg’ona, 2019 yil 30-31 may. 1-qism 146-bet.
8. **Ortiqov Z.U., Omonboyev O.** On tural fibers of plant origin. “Texnika va texnologik fanlar sohalarining innovasion masalalari” termiz respublika ilmiy-amaliy anjuman materiallari 30.11.2019 y. 143 b.
9. **Ortiqov Z.U.** Classification of textile fibers and the concept of fibers // *Наукоемкие исследования как основа инновационного развития общества. Сборник статей по итогам Международной научно-практической конференции терлита-мак, Российская Федерация 18 декабря 2019 г. С. 140-143.*
10. **Ortiqov Z.U., Mirzaahmedov M.** Mathematical models and anlgorithm of control of technological process of ginning. *Monografia pokonferencyjna science, research, development #24 Zakopane 29.12.2019 - 30.12.2019. Pp. 44-47.*

ОПТИКОВ З.У.

ПРОБЛЕМЫ ПРОЦЕССА УВЛАЖНЕНИЯ ХЛОПКА-СЫРЬЯ И ХЛОПКОВОГО ВОЛОКНА. ПРОБЛЕМЫ ПРОЦЕССА УВЛАЖНЕНИЯ ХЛОПКОВОГО ВОЛОКНА

*Кафедра компьютерного инжиниринга Андижанского государственного университета
Андижан, Республика Узбекистан*

Увлажнение хлопка-сырца и хлопкового волокна является критическим этапом в процессе производства текстиля, существенно влияющим на качество конечного продукта. Однако достижение оптимального содержания влаги представляет собой многочисленные проблемы. Одной из основных проблем является неравномерное распределение влаги во время обработки, что может привести к изменениям прочности и качества волокна. Неправильное применение воды или методов увлажнения часто приводит к усадке волокна, снижению долговечности и повышенному загрязнению. Кроме того, контроль температуры и влажности играет жизненно важную роль в предотвращении пересушивания или чрезмерного удержания влаги, оба из которых могут отрицательно повлиять на свойства прядения и обработки хлопковых волокон. Технологические ограничения в сочетании со сложностью точного контроля уровня влажности приводят к неэффективности в хлопкоперерабатывающей промышленности. Исследования также показали, что неправильное регулирование влажности может привести к снижению эффективности работы оборудования, увеличению потребления энергии и повышению вероятности повреждения волокна во время транспортировки и хранения. Поэтому для решения этих проблем требуются достижения в технологиях контроля влажности и разработка стандартизированных процедур для обеспечения постоянного и высококачественного производства хлопкового волокна.

Ключевые слова: влажность, переработка хлопка-сырца, качество волокна, поглощение влаги хлопком, методы увлажнения, процесс сушки, распределение влаги, прочность волокна, свойства хлопкового волокна, контроль температуры, восстановление влажности, обработка хлопка, регулирование влажности, эффективность обработки, усадка волокна, качество хлопкового ворса, смачивающие агенты, мониторинг влажности, кондиционирование хлопка, системы контроля влажности



Ortiqov Zaynobuddin Ulug'bekovich. Associate Professor of Computer Engineering Department of Andijan State University. **Orcid:** 0000-0002-2049-2167.

E-mail: ozaynobuddin@gmail.com

tel. +998914783731

Ортиков Зайнобиддин Улугбекович, доцент кафедры компьютерного инжиниринга Андижанского государственного университета.

E-mail: ozaynobuddin@gmail.com

tel. +998914783731

ALBAGOUSH A.A., KUPRIYANOV A.B.

ASSESSMENT OF SOLAR PANEL CONTAMINATION VIA ITS IMAGE IN LIBYA CLIMATE

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

Modern solar power plants are usually built in deserts, in conditions of lack of water and a lot of dust. Dustiness of solar panels leads to a decrease in their efficiency, and cleaning the panels from dust is an energy-consuming operation. The article discusses an approach to assessing the degree of contamination of a panel and making a decision about the need to clean it based on analysis of the panel image. An algorithm for making a cleaning decision is presented, a software application for assessing the degree of contamination of the panel is described, and the results of an experimental test of the created application are presented.

Keywords: solar panel, dust deposition, solar energy, cleaning of panels, image processing

Introduction

Modern solar power plants are several tens of square kilometers in size and contain millions of solar panels (SP). Such power plants are located mainly in desert areas, characterized by a lack of water sources and a large amount of dust. Dust on the surface of photovoltaic solar panels reduces their efficiency.

To assess the effect of solar panel dust on its output power, laboratory and field studies in Libyan conditions were carried out on the relative decrease in solar panel power depending on the density of dust on its surface. From the results obtained it follows that with a dust density of 5-20 grams/m², the output power is reduced by 5-10 % [1]. In other study, desert regions could lose power up to 80 % due to dust deposition [2].

Manual cleaning of panels from dust can take considerable time and is very expensive; periodic (for example, daily) automated cleaning of panels using cleaning robots leads to high energy costs, premature degradation of panel surfaces, and also does not take into account contamination during sand storms.

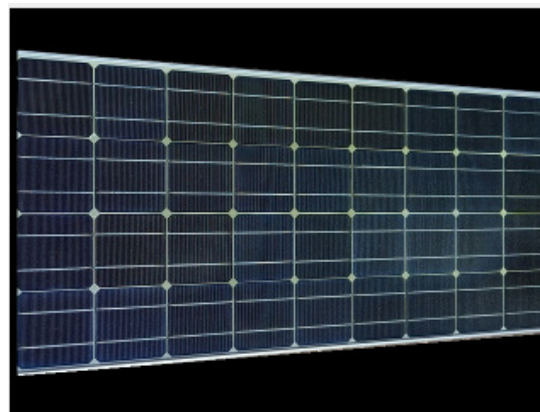
So, there is a need to constantly monitor the contamination of the surfaces of solar panels in order to decide on their automated cleaning when the panel output power decreases due to contamination. The output power of PV panel is a random value due to random changes of sun radiation level on the PV panel surface. Different methods of PV panel contamination estimation were researched.

The study in Northern Australia demonstrates precise, inexpensive, and user-friendly techniques for assessing PV panel dusting and soiling. The proposed image processing algorithms, particularly the Image Matching algorithm, outperform the human eye in identifying dust color and texture [3]. Other study utilized

statistical methods, image processing, and machine learning algorithms to intelligently monitor soiling state of solar panels, achieved a classification accuracy of 98.39 % [4]. While results in other study approved SolarQRNN, a probabilistic approach to quantifying using surveillance camera images, fares 51 % better in metrics evaluation on a solar panel soiling dataset than benchmark classification algorithms [5]. Additionally [6], confirm the possibility of using deep learning CNN based approach to detect dust on solar panel and predicted the power loss due to dust accumulation.

An assessment of the degree of contamination of a panel can be obtained by analyzing an image of dust on the panel surface. In this case, the image of the clean panel can be considered as the background, and the image of the dust as the foreground. To eliminate the influence of the background on the analysis result, you can calculate the difference between the images of clean and contaminated panels.

Images of clean panel and dusted panel and the difference of those two images are shown on the Figure 1.



a

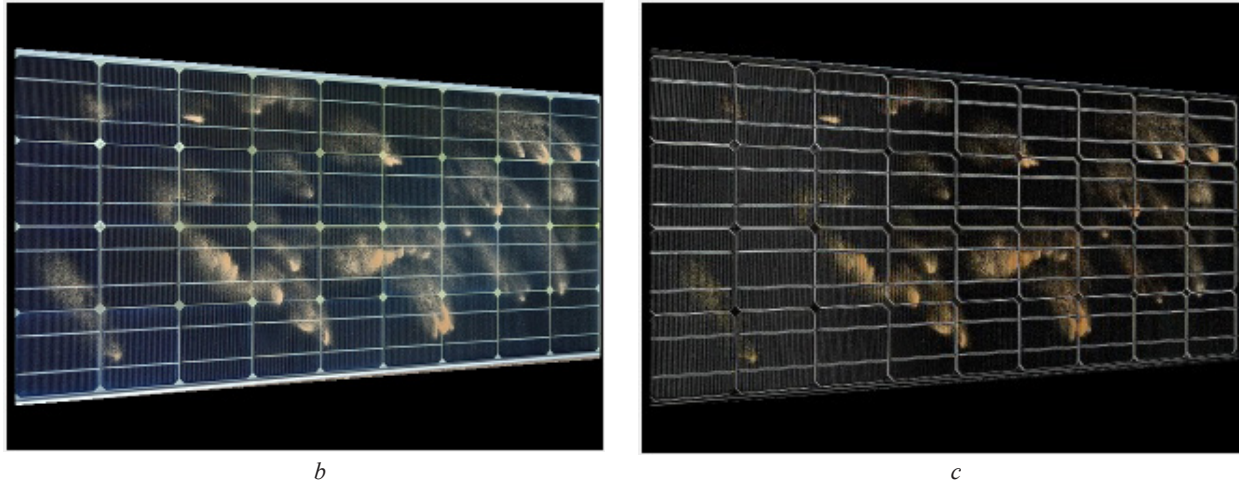


Figure 1. Images of PV panel *a* – clean panel, *b* – dusted panel, *c* – Difference of clean and dusted panel images

Mathematical model of the dust image

The pixel values of the stored clean SP image are the sum of the pixel brightness values of the image itself and the noise.

$$P(x,y) = P_0(x,y) + n_0(x,y), \quad (1)$$

where $P_0(x,y)$ is the image of the clean panel at the time of shooting; $n_0(x,y)$ – noise at the time of shooting.

The pixel values of the current SP image in the absence of dust (or very small quantity of dust) can be represented as:

$$D(x,y) = P_1(x,y) + n_1(x,y), \quad (2)$$

where $P_1(x,y)$ is the image of the panel itself at the time of shooting; $n_1(x,y)$ – noise at the time of shooting.

If there is dust, the pixel values of the current SP image can be represented as:

$$D(x,y) = P_2(x,y) + n_2(x,y), \quad (3)$$

where $P_2(x,y)$ is the image of the dusted panel itself at the time of shooting; $n_2(x,y)$ – noise at the time of shooting.

Since the time of obtaining the stored and current SP images are different, the images themselves $P_0(x,y)$, $P_1(x,y)$ are different. These differences are due to differences in panel illumination at different times. The noise realizations $n_0(x,y)$, and $n_1(x,y)$ obtained at different times will also be different. Therefore, the difference image in the absence of dust on the surface of the panel (or with a small amount of it) can be represented in the form:

$$\text{Dif}_{10}(x,y) = P_1(x,y) - P_0(x,y) + n_1(x,y) - n_0(x,y) = \Delta P_{10}(x,y) + n_{10}(x,y). \quad (4)$$

If there is dust on the surface of the panel, the difference image can be represented as:

$$\text{Dif}_{20}(x,y) = P_2(x,y) - P_0(x,y) + n_2(x,y) - n_0(x,y) = \Delta P_{20}(x,y) + n_{20}(x,y) \quad (5)$$

Noise can be considered a random normally distributed value.

The brightness values of each pixel can also be considered a random normally distributed value. The probability density of the brightness of one image pixel can be represented as:

$$w(x_i) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \cdot \frac{(x_i - m_x)^2}{\sigma^2}}. \quad (6)$$

In accordance with formulas 4 and 5, the mathematical expectation m_x will be different in the presence of dust and in its absence.

The set of pixel brightness values of the SP difference image can be considered a sample of a random process $\mathbf{X} = \{x_1, x_1, \dots, x_n\}$ where n is the number of image pixels. Considering the elements of this sample to be random independent normally distributed values, the multidimensional distribution density of the sample in the absence of dust can be represented as:

$$\begin{aligned} W(\mathbf{X}/H_0) &= \prod_{k=1}^n w(x_k) = \prod_{k=1}^n \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_k - m_0)^2}{2\sigma^2}\right) \\ &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^n (-(x_k - m_0)^2)\right). \end{aligned} \quad (7)$$

Similarly, the multidimensional probability density of the difference image in the presence of dust can be represented as:

$$\begin{aligned} W(\mathbf{X}/H_1) &= \prod_{k=1}^n w(x_k) = \prod_{k=1}^n \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(-\frac{(x_k - m_1)^2}{2\sigma^2}\right) \\ &= \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left(\frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^n (-(x_k - m_1)^2)\right). \end{aligned} \quad (8)$$

Consequently, the multidimensional probability density of a set of pixels of a difference image of the SP in the presence and absence of dust differs only in the average value of the pixel brightness.

Synthesis of a decision-making algorithm for cleaning SP

The task of making a decision about the dust content of a PN comes down to the task of testing a simple hypothesis H_1 that the average value of a set of random normally distributed variables is more than m_1 against the alternative H_0 that this parameter is less than m_1 . A sufficient statistic for testing the hypothesis H_1 against the alternative H_0 can be any monotonic transformation of the likelihood ratio:

$$\Lambda = \ln \frac{W(\mathbf{X}/H_1)}{W(\mathbf{X}/H_0)}. \quad (9)$$

As a result of analyzing the difference image of the SP, one of two possible solutions is necessary: A_0 – there is no dust or A_1 – there is dust. The decision rule in this case is based on calculating the likelihood ratio [7] and has the form:

$$\text{if } \Lambda = \ln \frac{W(\mathbf{X}/H_1)}{W(\mathbf{X}/H_0)} \leq \Lambda^* \text{ then } A_0 \text{ else } A_1, \quad (10)$$

where Λ^* – decision threshold; $W(\mathbf{X}/H_0)$ – multi-dimensional probability density of the integral difference image in the presence of dust; $W(\mathbf{X}/H_1)$ – multidimensional probability density of the integral difference image in the absence of dust.

The logarithm of the likelihood ratio in accordance with formulas 7 and 8 can be represented as:

$$\Lambda = \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^n (-(x_k - m_1)^2) - \frac{1}{2\sigma^2} \sum_{k=1}^n (-(x_k - m_0)^2). \quad (11)$$

$$\text{Or} \\ \Lambda = \sum_{k=1}^n x_k - \frac{n(m_1 + m_0)}{2}. \quad (12)$$

The second term in formula 12 does not depend on the brightness values of the pixels and can be taken into account in choosing the threshold value Λ^* . Optimal processing of a difference image will be the summation of the brightness values of all its pixels. Therefore, to make a decision about the need to clean the SP, it is necessary to generate the sum of the brightness values of

the difference between the images of the clean SP and the current SP image and compare it with the threshold Λ^* .

The decision-making algorithm on the need to clean the SP can be represented in the form

1. Obtain an image of the clean SP $P_0(x,y)$ and save it in memory (for example, as a file).

2. Periodically, with a certain time interval Δt , obtain the current image of the SP $P_1(x,y)$.

3. For each received current SP image, calculate the difference image

$$\text{Dif}(x,y) = P_1(x,y) - P_0(x,y). \quad (13)$$

4. Calculate the sum of the brightness values of all pixels (total brightness) in the difference image

$$\Lambda = \sum_{k=1}^n x_k. \quad (14)$$

5. Make a decision on the need to clean the joint venture according to the rule

$$\text{if } \Lambda > \Lambda^* \text{ then start cleaning the SP} \quad (15)$$

To implement the above algorithm and evaluate the relationship between the sum of the brightness of all pixels and the solar panel contamination density, a software application was developed that allows you to perform the following operations:

1. Open images of a clean and dusty panel.
2. Calculate the difference image using formula (13) within a mask covering only the image of the panel itself.

3. Calculate the sum of brightnesses of all pixels of the difference image in each color channel.

4. Calculate the total brightnesses of all pixels using the formula:

$$TB = \sum_{i=1}^3 \sum_{j=0}^{479} \sum_{k=0}^{639} (B_i(x_j, y_k)), \quad (16)$$

where $B_i(x_j, y_k)$ is the brightness level of the image pixel $\text{Dif}(x,y)$ in the j -th column of the k -th row in the i -th color channel.

The appearance of the interface of the developed application is shown in the figure 2.

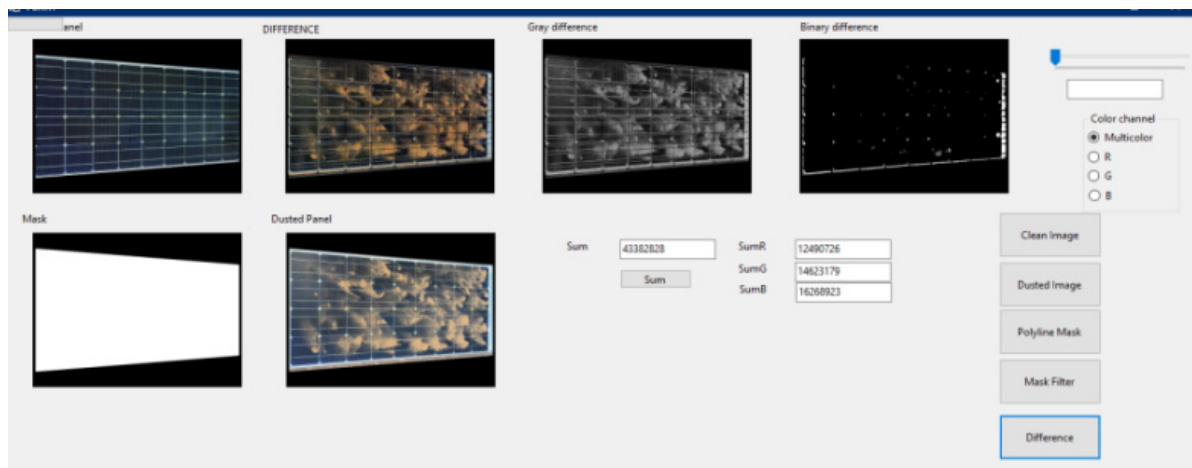


Figure 2. The software application interface

Experimental results

Using the created software, images of a solar panel obtained in the desert in Libya were examined at various densities of dust on its surface.

The experiments were carried out in the middle of the day at a solar radiation level of 910 W/m² using a Shell SQ85-P solar panel, the characteristics of which are given in Table 1.

Images of the panel and its power output values were obtained at dust densities of 0, 10, 20, 30 and 40 g/m². The resulting images were processed using the created software to obtain the total brightness of the dust image. The experimental results are presented in Table 2.

Table 1: The characteristics of solar panel.

PV Module Characteristics	Description
Module	Shell SQ85-P
Maximum Power (Pmax)	85 W
Rated Current	4.95A
Rated Voltage	17.2V
Open Circuit Voltage (Voc)	22.2V
Short Circuit Current (Isc)	5.45 A
Size	1.20*0.527m ²
STC	1000 W/M2 .25C.AM 1.5

Table 2. The output power and the total brightness of differences between the images

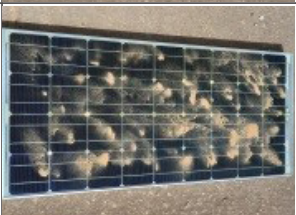
Dust (g/m ²)	SP image	P (W)	P (%)	P-loss (%)	Total brightness
0		67.50533	100	0	0
10		64.54068	95.60827	4.391733	36509535
20		60.92114	90.24641	9.753588	37419284
30		57.00919	84.45139	15.54861	42088638
40		56.51516	83.71955	16.28045	43382828

Figure 3 shows a graph of the dependence of solar panel power losses on dust density. Figure 4 shows a

graph of the dependence of the total brightness of the difference image of the panel on the dust density.

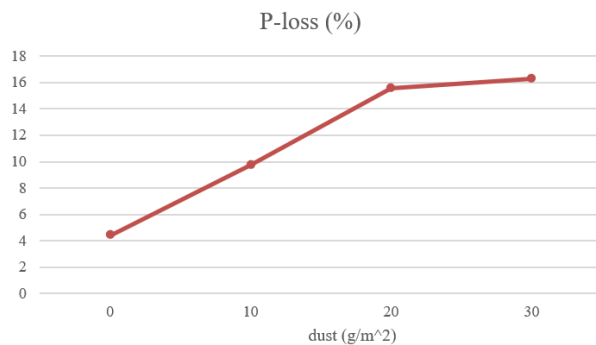


Figure 3. Graph of the dependence of solar panel power losses on dust density

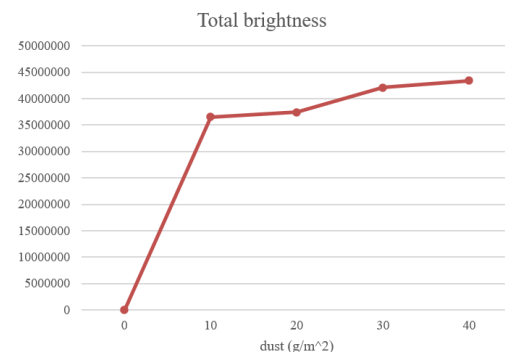


Figure 4. Graph of the dependence of total brightness on dust density

Conclusion

The degree of dustiness of a solar panel can be assessed by the difference between the images of a clean panel and a dusty one. An indicator of dustiness can be the total brightness of the difference image, which is sufficient statistics to make a decision about the need to

clean the solar panel. The value of the total brightness of the difference image is proportional to the power loss of the solar battery when it becomes dusty.

Acknowledgement

Many grateful thanks to The Libyan Center for Solar Energy Research and Studies, Tajoura, Libya.

REFERENCES

1. **Albagoush A.A., Abuauba A.B., Kupriyanov A.B.** Study of the effect of dust deposition on solar panels in Libya. *Mathematical methods in technologies and technics*, 2023, no. 10, pp. 76-81. DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_10_76
2. **Hasan K. [et al.]**. Effects of different environmental and operational factors on the PV performance: A comprehensive review *Islam Energy Science and Engineering*, John Wiley and Sons Ltd, 2022, vol. 10, no. 2. pp. 656-675. DOI: 10.1002/ese3.1043
3. **W. Kean Yap, R. Galet, and K.C. Yeo.** Quantitative Analysis of Dust and Soiling on Solar PV Panels in the Tropics Utilizing Image-Processing Methods. *Proceedings of the Asia Pacific Solar Research Conference 2015*, Publ.: Australian PV Institute, Ed.: R. Egan and R. Passey, Dec 2015.
4. **Po-Ching Hwang, H.** Intelligent cleanup scheme for soiled photovoltaic modules / H. Po-Ching Hwang, C.C.Y. Ku, M. Chao-Yang Huang *Energy*, Feb. 2023, vol. 265. DOI: 10.1016/j.energy.2022.126293
5. **Zhang W.** Deep-learning-based probabilistic estimation of solar PV soiling loss / W. Zhang, S. Liu, O. Gandhi, C.D. Rodriguez-Gallegos, H. Quan, D. Srinivasan. *IEEE Trans Sustain Energy*, 2021, vol. 12, no. 4, pp. 2436-2444. DOI: 10.1109/TSTE.2021.3098677
6. **Ritu M., Shamaun A., Asutosh P.** An approach for detection of dust on solar panels using CNN from RGB dust image to predict power loss. *Cognitive Computing in Human Cognition: Perspectives and Applications (Learning and Analytics in Intelligent Systems)*, 2020, pp. 41-48. DOI: 10.1007/978-3-030-48118-6_4
7. **Levin B.R.** Theoretical foundations of statistical radio engineering. 3rd ed., revised and enlarged. M.: Radio and communication, 1989, 656 p.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Альбагуш, А.А.** Исследование влияния осаждения пыли на солнечные панели в Ливии / А.А. Альбагуш, А.Б. Абуауба, А.Б. Куприянов. *Математические методы в технологиях и технике*. 2023. № 10. С. 76-81. DOI: 10.52348/2712-8873_MMTT_2023_10_76
2. **Хасан, К.** Влияние различных факторов окружающей среды и эксплуатации на производительность фотоэлектрических систем: комплексный обзор / К.Хасан, С.Б. Юсуф, М.С. Тушар, Б.К. Дас, П. Дас, М.С. Ислам *Энергетическая наука и техника*, 2022. Т. 10, №. 2. С. 656–675. DOI: 10.1002/ese3.1043

3. **Киан В.Я., Галет Р., Йео К.Ц.** Количественный анализ запыления и загрязнения на солнечных фотоэлектрических панелях в тропиках с использованием методов обработки изображений. Труды Азиатско-Тихоокеанской конференции по исследованиям солнечной энергетики 2015 г. Австралийский институт фотоэлектрических систем. Ред.: Р. Эган и Р. Пасси, Декабрь 2015 г.

4. **По-Чинг Хванг, Х.** Интеллектуальная схема очистки загрязненных фотоэлектрических модулей / Х. По-Чинг Хванг, Ц.Ц. Ку, М. Чао-Янг Хуанг. Энергия, 2023. Т. 265. DOI: 10.1016/j.energy.2022.126293

5. **Жанг, В.** Вероятностная оценка потерь от загрязнения солнечных фотоэлектрических систем на основе глубокого обучения / В. Жанг, С. Лиу, О. Гандхи, С.Д. Родригес-Галлегос, Х. Куан, Д. Сринивасан // IEEE Trans Sustain Energy, 2021. Т. 12, № 4. С. 2436–2444. DOI: 10.1109/TSTE.2021.3098677

6. **Риту, В.** Подход к обнаружению пыли на солнечных панелях с использованием сверточной нейронной сети на основе RGB-изображения пыли для прогнозирования потерь мощности / В. Риту, А. Шамаун, П. Асутош // Когнитивные вычисления в человеческом познании: перспективы и приложения (обучение и аналитика в интеллектуальных системах) Springer. 2020;17. DOI: 10.1007/978-3-030-48118-6_4

7. **Левин, Б.Р.** Теоретические основы статистической радиотехники / Б.Р. Левин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1989. – 656 с.



Albagoush Alaaeddin Ali is pursuing his PhD in Computer Engineering in Belarusian National Technical University. He is currently working as head of the communications department at the General Electricity Company of Libya. He received Master's Degree in Electrical and Electronics Engineering from Turkish Aeronautical Association University in the year 2017. He received training on programming and maintaining RTUs in France in 2019. Interested in solar energy projects in Libya and studying ways to increase the efficiency of solar energy.

Альбагуш А.А., аспирант кафедры программного обеспечения информационных систем и технологий БНТУ.

E-mail: alaa-Eddin1@hotmail.com



Kupriyanov Andrey Borisovich, PhD, Associate professor at the Software Department of the Belarusian National Technical University. His research interests include methods and algorithms of artificial intelligence and images processing.

Куприянов А.Б., доцент кафедры программного обеспечения информационных систем и технологий БНТУ.

E-mail: abkupriyanov@bntu.by

АЛЬБАГУШ А.А., КУПРИЯНОВ А.Б.

ОЦЕНКА ЗАГРЯЗНЕННОСТИ СОЛНЕЧНОЙ ПАНЕЛИ ПО ИЗОБРАЖЕНИЮ В КЛИМАТЕ ЛИВИИ

*Белорусский национальный технический университет
г. Минск, Республика Беларусь*

Современные солнечные электростанции обычно строятся в пустынях, в условиях недостатка воды и большого количества пыли. Запыленность солнечных панелей приводит к снижению их эффективности, а очистка панелей от пыли является энергозатратной операцией. В статье рассматривается подход к оценке степени загрязненности панели и принятию решения о необходимости ее очистки на основе анализа изображения панели. Представлен алгоритм принятия решения об очистке, описано программное приложение для оценки степени загрязненности панели, а также приведены результаты экспериментальной проверки созданного приложения.

Ключевые слова: солнечная панель, осаждение пыли, солнечная энергия, очистка панелей, обработка изображений

ПАВЛЮКОВЕЦ С.А., ВЕЛЬЧЕНКО А.А., РАДКЕВИЧ А.А.

ПОВЕДЕНИЕ МОБИЛЬНОГО РОБОТА С СИММЕТРИЧНОЙ СТРУКТУРОЙ КОЛЕС МЕКАНУМ ПРИ ПЕРЕМЕЩЕНИИ ПО КРИВОЛИНЕЙНОЙ ТРАЕКТОРИИ

Белорусский национальный технический университет
Минск, Республика Беларусь

В статье проведён сравнительный анализ двух вариантов симметричного размещения всенаправленных колёс типа меканум в мобильном роботе. Рассмотрено моделирование поведения мобильного робота при двух симметричных вариантах расположения колёс меканум по криволинейным траекториям в среде MATLAB Simulink. Получены графики траекторий центра робота в осях X–Y при двух вариантах симметричных конфигураций меканум-колёс при перемещении по траекториям лемнискаты, эллипса, гипотрохоиды и трека. Получены зависимости ошибок положения робота в осях X–Y от времени для двух вариантов топологий колёс при перемещении по четырём траекториям. Проанализированы зависимости отклонения угла поворота корпуса робота от времени для двух вариантов топологий колёс при перемещении по четырём криволинейным траекториям. Проведённый сравнительный анализ позволил дать рекомендации о перемещении вдоль эллипса и лемнискаты, которые характеризуется меньшими ошибками положения и отклонением угла поворота по сравнению с более сложными кривыми.

Ключевые слова: мобильный робот, меканум колесо, симметричная структура, матрица Якоби, движение по траектории, эллипс, лемниската, эпитрохоида, трек, ошибка позиционирования

Введение

Всенаправленные четырёхколёсные мобильные роботы на меканум-колёсах, расположенных параллельно корпусу, имеют в общей сложности 16 возможных топологий [1]. Принимая во внимание, что угол наклона роликов относительно оси вращения колёс составляет $\pm 45^\circ$, комбинации одного либо нескольких меканум-колёс образуют конфигурацию, которая с точки зрения кинематики обладает определённой управляемостью.

С пространственной точки зрения оценка управляемости и возможности реализации голономного движения может основываться на характере пересечений линий осей вращения роликов [2]. Считается, что всенаправленными являются конфигурации, в которых линии осей вращения колёсных роликов пересекаются в четырёх точках. Всего существует 6 вариантов такого расположения меканум колёс. Однако, оценка управляемости робота также зависит от положения пересечения линий. Хорошую управляемость имеют лишь варианты расположения меканум колёс, в которых точки пересечения линий симметричны относительно центра робота [2].

С точки зрения кинематики оценка реализации всенаправленного движения основывается на анализе матрицы пространства состояний робота – матрицы Якоби. Всенаправленное движение способны обеспечить варианты конфигураций меканум-колёс, матрица Якоби которых является полноранговой, а ранг матрицы равен 3.

Исходя из этого, существуют две конфигурации симметричного размещения колёс меканум в мобильном роботе, удовлетворяющих условиям полноранговой матрицы Якоби с рангом, равным 3 и пересечением линий осей вращения колёсных роликов в 4 точках. Эти две конфигурации с указанием соответствующих им матриц Якоби представлены на рис. 1.

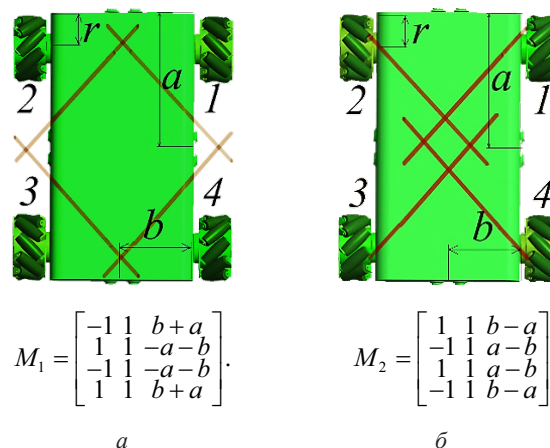


Рисунок 1. Симметричные пространственные топологии расположения меканум колёс в мобильном роботе с указанием соответствующих им матриц Якоби:
а) конфигурация с размещением колес наружу;
б) конфигурация с размещением колес во внутрь

В робототехнике одинаково широко используются оба симметричных варианта расположения

меканум колёс в работе. К примеру, при анализе кинематики мобильных роботов, в статьях [3-6] авторы рассматривают конфигурацию, изображённую на рис. 1, а). В других исследованиях [7-10] анализируются мобильные роботы с топологией колёс, показанной на рис. 1, б).

В статье [11] проведён анализ устойчивости и маневренности робота с двумя вариантами симметричных конфигураций меканум колёс на основе значений обратной матрицы скоростей Якоби и глобального индекса жесткости. Был сделан вывод, что робот с топологией, соответствующей рис. 1, а) движется более точно и стабильно и имеет большую жесткость и общий индекс жесткости, чем робот с топологией, изображённой на рис. 1, б).

В работе [2], наоборот, отмечено, что, если линии вращения роликов нижних колёс образуют четырёхугольник и пересекаются в одной точке, ранг столбца матрицы Якоби изменится с 3 на 2 и топология не сможет обеспечить всенаправленное движение. Топология, показанная на рис. 1, б) была названа авторами наиболее оптимальной для мобильного робота на колёсах меканум.

На практике для хорошей управляемости робота, помимо выполнения условий симметричных топологий, требуются высокие ходовые качества и динамика в управлении. В рамках представленной статьи авторы анализируют поведение мобильного робота при двух вариантах расположения меканум колёс (рис. 1, а и рис. 1, б) в процессе перемещения по криволинейным траекториям. Для достижения этой цели проведено имитационное моделирование в среде MATLAB Simulink, где модель робота учитывает, как кинематику, так и динамические условия движения.

Позиционное перемещение робота по четырём криволинейным траекториям

Криволинейные траектории, описываемые разностными и дифференциальными уравнениями, являются наиболее часто встречающимися траекториями движения роботов. Особенно представляют интерес замкнутые кривые высоких порядков, позволяющие проанализировать движение робота во всех квадрантах координатной плоскости. Для анализа поведения робота рассмотрены четыре криволинейные траектории: эллипс, лемниската, гипотрохоида и трек.

Эллипс и гипотрохоида являются замкнутыми циклоидальными кривыми второго порядка, которые описываются параметрическими уравнениями в декартовой системе:

$$\begin{cases} x(\varphi) = (R-r) \cdot \cos \varphi + h \cdot \cos\left(\frac{R-r}{r} \varphi\right) \\ y(\varphi) = (R-r) \cdot \sin \varphi - h \cdot \sin\left(\frac{R-r}{r} \varphi\right) \end{cases} \quad (1)$$

где R – радиус внешней окружности, м; r – радиус внутренней окружности, м; h – расстояние от точки координат гипотрохоиды до центра внутренней окружности, м; φ – угол, образованный горизонталью и точкой координат гипотрохоиды, принимает значения от 0° до 360° ; x, y – текущие координаты гипотрохоиды в функции угла φ .

Уравнение эллипса описывается формулой (1) в случае, когда $R = 2 \cdot r, d \neq r$.

Для моделирования гипотрохоиды зададимся параметрами: $R = 0,675$ м, $r = 0,25$ м, $d = 0,4$ м, половина длины робота (расстояние a на рис. 1) $0,17$ м, половина ширины робота (расстояние b на рис. 1) $0,12$ м, радиус колеса меканум $0,06$ м, движение происходит в течение 10 с. Для моделирования эллипса значения аналогичны, за исключением $r = R/2$. Результаты моделирования траекторий гипотрохоиды и эллипса показаны на рис. 2.

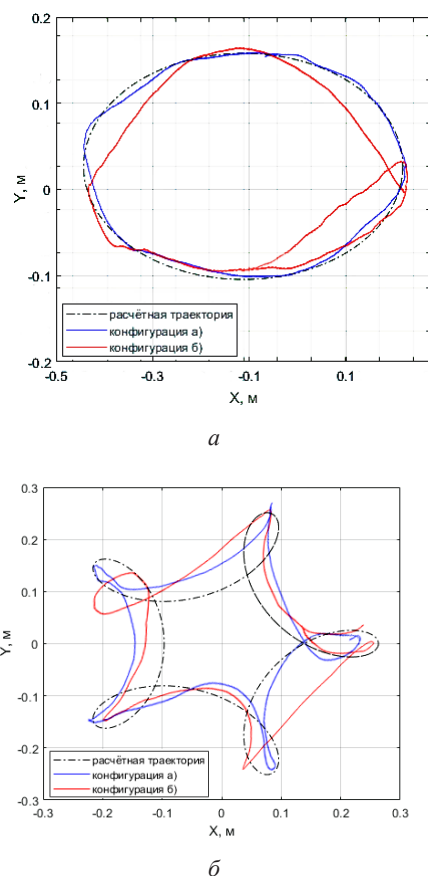


Рисунок 2. Графики перемещения робота при двух вариантах симметричного расположения колёс меканум по траекториям: а) эллипс; б) гипотрохоида

Лемниската является замкнутой кривой четвертого порядка, определяемой параметрическими уравнениями:

$$\begin{cases} x(t) = \frac{a \cdot \cos t}{1 + \sin^2(t)}; \\ y(t) = \frac{a \cdot \sin t \cdot \cos t}{1 + \sin^2(t)} \end{cases} \quad (2)$$

где a – полуширина лемнискаты (половина фокусного расстояния), м; t – время моделирования, с; x, y – текущие координаты лемнискаты.

Для моделирования принимаем $a = 0,6$ м.

Траектория «трек» представляет произвольную кривую, сочетающую элементы эллиптических и циклоидальных кривых. Моделирование трека в Simulink реализовано при помощи сплайновой интерполяции В-сплайн функции, содержащей путевые точки следования по траектории. Результаты моделирования траекторий лемнискаты и трека показаны на рис.3.

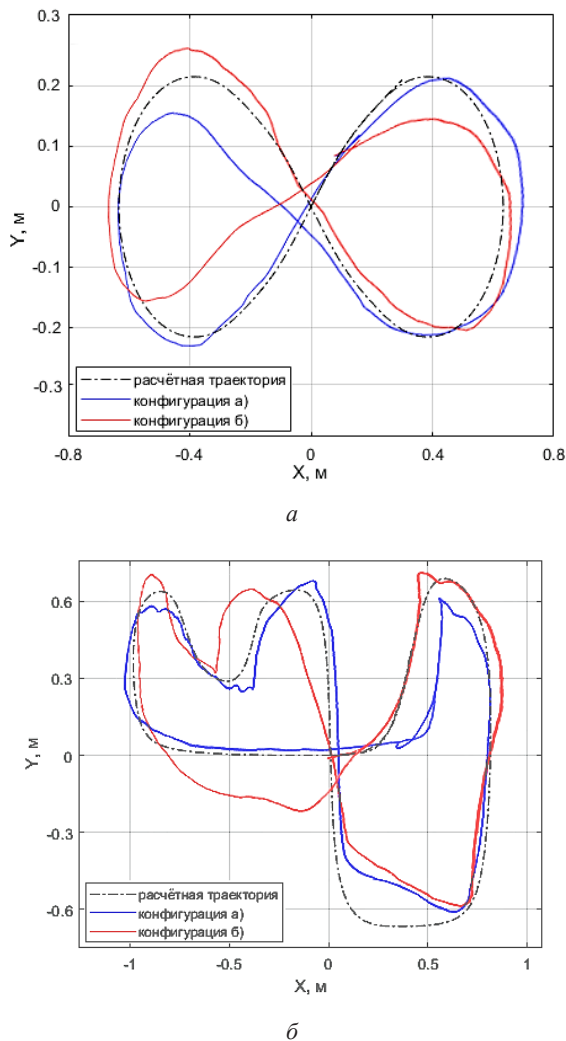


Рисунок 3. Графики перемещения робота при двух вариантах симметричного расположения колёс меканум по траекториям: а) лемниската; б) трек

На графиках (рис. 2, 3) показано наложение расчётной траектории кривой (пунктирная линия чёрного цвета) и фактические траектории, пройденные роботом при двух вариантах симметричного расположения колёс: при топологии, показанной на рис. 1, а) – синим цветом сплошной линией, при топологии, показанной на рис. 1, б) – красным цветом сплошной линией.

Анализ позиционирования робота при криволинейном движении

Анализ позиционирования мобильного робота на меканум колёсах базируется на оценке двух параметров, характеризующих его маневренность и управляемость: ошибки по положению e , определяющей отклонение робота от заданной траектории, и угла поворота корпуса φ , который определяет всенаправленность робота.

Комбинированный трехмерный график ошибок позиционирования робота в осях X и Y по четырём траекториям, содержащий сведения о двух вариантах симметричного расположения меканум колёс и график зависимостей углов поворота корпуса робота от времени для случаев двух вариантов симметричного расположения меканум колёс по четырём траекториям, приведены на рис. 4.

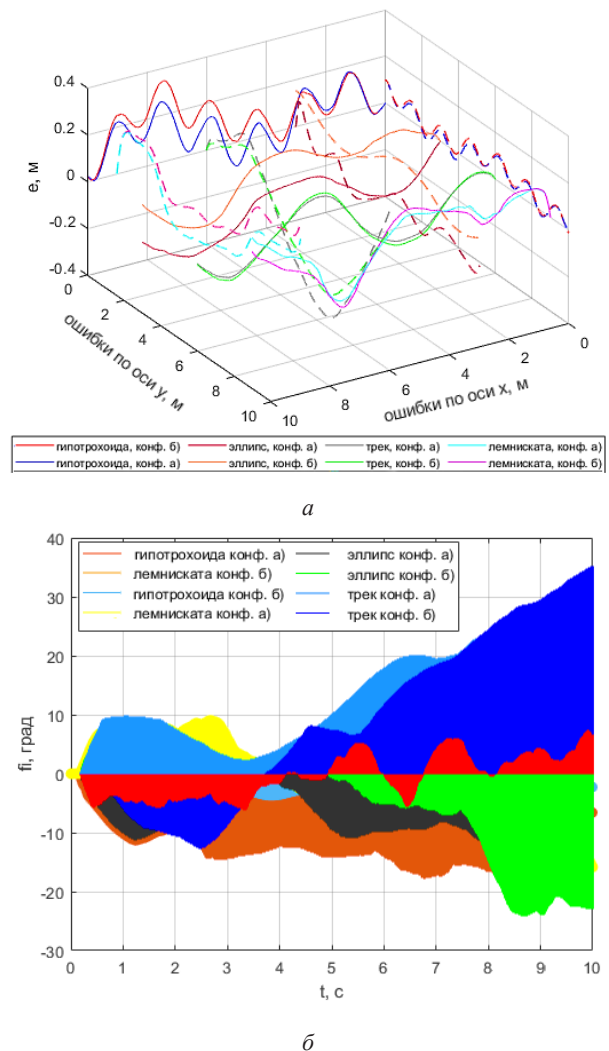


Рисунок 4. а) График ошибок положения по осям X и Y для двух вариантов симметричного расположения меканум колёс по четырём траекториям $e_{x,y} = f(t)$; б) График углов отклонения корпуса робота от времени для двух вариантов симметричного расположения меканум колёс по четырём траекториям $\varphi_{x,y} = f(t)$

Анализ графиков ошибок по положению (рис. 4, а) показал наличие отклонений, принимающих максимальное значение 0,37 м по оси X и 0,31 м по оси Y . Наиболее точное позиционирование робота зафиксировано при перемещении по траектории эллипса и лемнискаты. Для эллипса максимальная ошибка положения при симметричной конфигурации рис. 1, а) составила 0,02 м, при конфигурации рис. 1, б) максимальная ошибка равна 0,063 м. При отработке траектории лемнискаты наибольшая ошибка положения равнялась 0,11 м для топологии рис. 1, а) и 0,17 м для топологии рис. 1, б).

Наихудшие результаты по ошибке положения отмечены при перемещении робота по треку. Наибольшее отклонение по оси X составило 0,33 м для конфигурации рис. 1, б) и 0,24 м для другой конфигурации. При отработке траектории гипотрохоиды заметные отклонения по осям X и Y наблюдались для конфигурации б) и составили 0,19 м, для конфигурации а) составили 0,1 м.

Прослеживается тенденция к увеличению ошибки позиционирования робота при усложнении формы траектории и увеличении порядка кривой. Учитывая, что в реальном роботе имеются инерционности и задержки, влияющие на динамику, а во время движения действуют силы трения и силы реакции опоры, в траекториях с частым и более интенсивным изменением курса наблюдаются наибольшие отклонения.

Анализ графиков угла отклонения корпуса робота от времени имеет корреляцию с графиками ошибок позиционирования. Максимальные отклонения робота происходили при передвижении по треку и гипотрохоиде и составили 36° и минус 23° соответственно. Причём для топологии б) отклонения угла более существенны, чем для конфигурации а). Наименьшие отклонения угла поворота корпуса отмечены при отработке траекторий лемнискаты: $8,9^\circ$ для конфигурации а) и $9,9^\circ$ для конфигурации б) и эллипса: $12,7^\circ$ для конфигурации а).

Заключение

В результате проведённого анализа можно сделать некоторые выводы о поведении механум-робота при двух вариантах симметричных топологий колёс при перемещении вдоль четырёх криволинейных траекторий.

1. Перемещение вдоль траекторий, имеющих меньшую кривизну и меньшую интенсивность изменения кривой и описываемых уравнениями меньшего порядка (эллипс, лемниската) характеризуется меньшими ошибками положения и отклонением угла поворота корпуса по сравнению с кривыми более высоких порядков сложной формы. Это связывается с влиянием внешних и внутренних динамических факторов, вызывающих задержку и ухудшение управляемости в моменты интенсивной смены курса траектории.

2. Симметричная колёсная конфигурация, показанная на рис. 1, а) обладает более высокими динамическими показателями по сравнению с конфигурацией, показанной на рис. 1, б). Ошибки положения и угла отклонения корпуса робота принимают большие значения. Это подтверждает выводы, сделанные в статье [12] и может учитываться при дальнейшем анализе управляемости механум-робота.

В заключение необходимо отметить, что при рассмотрении траекторного управления автономными мобильными роботами для повышения качества их движения перспективными вариантами являются применение адаптивных, нечётких и нейросетевых регуляторов скорости и положения.

Благодарности

Работа выполнена за счет гранта Министерства образования Республики Беларусь (рег. № 20240802).

Acknowledgements

The work was supported with a grant of the Ministry of Education of the Republic of Belarus (registration no. 20240802).

REFERENCES

1. Mishra S., Sharma M., Mohan S. Behavioural Fault tolerant control of an Omni directional Mobile Robot with Four mecanum Wheels. Defence Science Journal. 2019. Vol. 69. No. 4. Pp. 353-360. DOI: 10.14429/dsj.69.13607
2. Li Y., Dai S., Zhao L., Yan X., Shi Y. Topological Design Methods for Mecanum Wheel Configurations of an Omnidirectional Mobile Robot. Symmetry. 2019. No. 11 (10) 1268. DOI: 10.3390/sym11101268
3. P. Chotikunnan, T. Matsuura, N. Thongpance, M. Sangworasil, M. Pluemchan, T. Wannarat, and A. Teerasoradech. The design and construction of surrounding control system for the rehabilitative walker using mecanum wheel. 2017 10th Biomedical Engineering International Conference (BMEiCON), Hokkaido, Japan. 2017. Pp. 1-4. DOI: 10.1109/BMEiCON.2017.8229166
4. R. Wen, M. Tong. Mecanum wheels with Astar algorithm and fuzzy PID algorithm based on genetic algorithm. 2017 International Conference on Robotics and Automation Sciences (ICRAS), Hong Kong, China. 2017. Pp. 114-118. DOI: 10.1109/ICRAS.2017.8071927

5. V. Alakshendra, S.S. Chiddarwar. A robust adaptive control of mecanum wheel mobile robot: simulation and experimental validation. 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS), Daejeon, Korea (South). 2016. Pp. 5606-5611. DOI: 10.1109/IROS.2016.7759824
6. P. Vlantis, C. P. Bechlioulis, G. Karras, G. Foulas, K.J. Kyriakopoulos. Fault tolerant control for omni-directional mobile platforms with 4 mecanum wheels. 2016 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA), Stockholm, Sweden. 2016. Pp. 2395-2400. DOI: 10.1109/ICRA.2016.7487389
7. M.A.A. Mutalib, N.Z. Azlan, I.A.-T.B. Mahmood. Modelling of Mobility Mechanism for Motorized Adjustable Vertical Platform (MAVeP). 2018 IEEE International Conference on Automatic Control and Intelligent Systems (I2CACIS), Shah Alam, Malaysia. 2018. Pp. 39-46. DOI: 10.1109/I2CACIS.2018.8603699
8. Z. Lieping, H. Chaoning, C. Peng. Retracted: Design of Limited Power Omni-Directional Vehicle Based on Chassis Follow. 2017 International Conference on Smart City and Systems Engineering (ICSCSE), Changsha, China. 2017. Pp. 10-13. DOI: 10.1109/ICSCSE.2017.10
9. S. Shahin, R. Sadeghian, P. Sedigh, M.T. Masouleh. Simulation, control and construction of a four Mecanum-wheeled robot. 2017 IEEE 4th International Conference on Knowledge-Based Engineering and Innovation (KBEI), Tehran, Iran. 2017. Pp. 0315-0319. DOI: 10.1109/KBEI.2017.8324993
10. M.A. Abd Mutalib, N.Z. Azlan. Prototype development of mecanum wheels mobile robot: A review. // Applied Research and Smart Technology (ARSTech). № 1 (2). 2020. Pp. 71–82. DOI: 10.23917/arstech.v1i2.39
11. He C, Wu D, Chen K, Liu F, Fan N. Analysis of the Mecanum wheel arrangement of an omnidirectional vehicle. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science. № 233 (15). 2019. Pp. 5329-5340. DOI: 10.1177/0954406219843568

PAULIUKAVETS S.A., VELCHENKO A.A., RADKEVICH A.A.

BEHAVIOR OF A MOBILE ROBOT WITH SYMMETRICAL STRUCTURE OF MECANUM WHEELS WHEN MOVEMENT ALONG A CURVILINEAR TRAJECTORY

Belarusian National Technical University
Minsk, Republic of Belarus

The article presents a comparative analysis of two variants of symmetrical placement of omnidirectional mecanum wheels in a mobile robot. The modeling of the mobile robot behavior with two symmetrical variants of mecanum wheel arrangement along curvilinear trajectories in the MATLAB Simulink environment is considered. Graphs of the robot center trajectories in the X–Y axes are obtained for two variants of symmetrical mecanum wheel configurations when moving along the trajectories of a lemniscate, ellipse, hypotrochoid, and track. Dependences of the robot position errors in the X–Y axes on time are obtained for two variants of wheel topologies when moving along four trajectories. Dependences of the robot body rotation angle deviation on time are analyzed for two variants of wheel topologies when moving along four curvilinear trajectories. The comparative analysis made it possible to give recommendations on movement along the ellipse and lemniscate, which are characterized by smaller position errors and deviations in the rotation angle compared to more complex curves.

Keywords: mobile robot, mecanum wheel, symmetrical structure, Jacobian matrix, motion along a trajectory, ellipse, lemniscate, epitrochoid, track, positioning error



Павлюковец Сергей Анатольевич, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета. Область научных интересов связана с разработкой методов и алгоритмов управления мобильными роботами.

Siarhei A. Pauliukavets is a PhD, associate professor, head of the Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes department of the Belarusian National Technical University. The area of scientific interests is related to the development of methods and algorithms for controlling mobile robots.

E-mail: sap@bntu.by, s.pauliukavets@gmail.com



Вельченко Анна Александровна, кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета. Область научных интересов связана с разработкой и исследованием нейросетевых регуляторов для электропривода в мобильной робототехнике и солнечной энергетике.

Anna A. Velchenko is a PhD, associate professor, associate professor the Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes department. The area of scientific interests is related to the development and research of neural network controllers for electric drives in mobile robotics and solar energy.

E-mail: eapu@bntu.by, anna.velchenko@gmail.com



Радкевич Артём Андреевич, магистрант кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» Белорусского национального технического университета. Область научных интересов связана с применением нейросетевых и адаптивных технологий управления электроприводами в мобильной робототехнике.

Artsiom A. Radkevich is a master student of the Electric drive and automation of industrial installations and technological complexes department of the Belarusian National Technical University. The area of scientific interests is related to neural network control of electric drives in wheeled mobile robotics.

E-mail: radkevichaa@bntu.by, artsiom.a.radkevich@gmail.com

**ОБРАБОТКА
ИНФОРМАЦИИ
И ПРИНЯТИЕ РЕШЕНИЙ**

**DATA PROCESSING
AND
DECISION-MAKING**

ГОЛУБ Ю.И.

БЕЗЭТАЛОННАЯ ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ЦИФРОВОГО ИЗОБРАЖЕНИЯ СТАТИЧЕСКОЙ ПОДПИСИ

*Государственное научное учреждение "Объединенный институт проблем информатики
Национальной академии наук Беларуси"
г. Минск, Республика Беларусь*

Цель данной работы заключается в разработке простого критерия оценки качества цифрового изображения подписи, которая была выполнена на бумаге и отсканирована (т.е. статическая подпись). Предложенный подход может быть использован как инструмент мониторинга образцов подписи в биометрических системах распознавания для контроля качества данных. Например, при регистрации изображения, выборе метода обработки и настройки его параметров, после выполнения различных операций (поворота, масштабирования) и необходимости оценки и анализа полученных изображений подписи. Также в работе описаны факторы, которые могут негативно влиять на качество статической подписи, и выполнен экспериментальный анализ на цифровых изображениях подписей, представленных в базах CEDAR, BHSig260-Bengali, SigComp2009 и изображениях, собранных в процессе выполнения исследования.

Ключевые слова: биометрическая система, бинарное изображение, цифровое изображение подписи человека, оценка качества бинарных изображений, рукописная подпись

Введение

В современном мире биометрические технологии играют важную роль в обеспечении защиты и распознавания личности. Благодаря своей простоте и удобству использования рукописная подпись – один из наиболее распространённых методов индивидуальной аутентификации человека [1, 17, 18]. Люди используют свою подпись в государственных и коммерческих организациях для подтверждения личности при совершении финансовых операций, заключении соглашений и договоров, подписании долговых расписок и т. д. Однако даже профессиональные криминалистические эксперты, работающие с документами, достигают правильной классификации примерно в 70 % случаев, что подтверждает сложность этой области исследований [1]. Привлечение человека для распознавания подписей и оценки их качества может быть дорогостоящим и трудоёмким процессом. В такой ситуации для оптимизации процесса и повышения точности распознавания можно использовать автоматизированные системы обработки и анализа подписей.

В настоящее время человек может подписывать документы используя ручку и бумагу, а также – планшет и стилус [25, 5]. В первом варианте проверка подписи выполняется офлайн (статически), при этом подпись представляется в виде цифрового изображения. Во втором случае – онлайн (динамически) и образец представлен бóльшим количеством информации. В зависимости от используемого планшета, это могут быть пространственные и

временные координаты пера, давление на планшет, угол наклона пера.

Основная задача любой системы распознавания подписи – это автоматически отличить подлинную подпись от поддельной. Одним из предварительных этапов такой системы является анализ качества предъявляемых цифровых изображений, т. к. на производительность биометрических систем в значительной степени влияет качество данных [1, 2]. Поэтому важной и актуальной задачей является создание эффективных методов и алгоритмов оценки качества изображений подписей.

В последние годы растёт популярность нейронных сетей (НС), в том числе при решении задач оценки качества цифровых изображений. В этом случае чаще всего используется следующий подход: обучение НС на базе эталонных изображений с последующей классификацией и оценкой качества бинарных изображений. Однако при решении задач распознавания подписи человека не всегда есть доступ к эталонным изображениям. А генерация достаточного количества подписей с помощью различных вариаций по-прежнему остается сложной и до конца нерешенной задачей [11, 20].

В последние годы активно ведутся исследования в области оценки качества биометрических данных, но до сих пор нет единого стандарта и правил для универсальных оценок качества, нет решения о том, какие критерии считать ключевыми, определяя качество того или иного биометрического образца.

Процесс распознавания подписи может осуществляться биометрической системой в двух режимах [12]:

1) идентификация – определение владельца подписи, т. е. сопоставление «один ко многим» (выполняется сравнение подписи человека со всеми шаблонами, хранящимися в базе данных). Система может выбрать либо «лучшее» совпадение, либо оценить возможные совпадения и расположить их в порядке сходства;

2) верификация – проверка того, является ли человек тем, за кого себя выдает, т. е. сравнение «один к одному» (система выполняет сравнение подписи с одним выбранным шаблоном, хранящимся в базе данных). Такой метод применяется, когда целью является обеспечение безопасности и ограничение доступа к определенным объектам с явно сотрудничающими пользователями.

Распознавание подписи выполняется на основе бинарного представления. Данный этап используют по нескольким причинам [14–15]:

– упрощение процесса обработки: бинаризация изображений уменьшает количество деталей, что позволяет сконцентрироваться на ключевых элементах подписи, таких как контур, структура, форма, положение и т. д. На рисунке 1 слева представлены полутоновое и цветное изображения, а справа – результаты их бинаризации. Можно заметить, что двоичное представление подписи подчёркивают ее основные черты, делая более выразительной для последующего анализа, позволяя сосредоточиться на главном и не учитывать информацию о цвете и оттенках. Важно отметить, что правильно настроенная бинаризация улучшает точность выделения ключевых характеристик подписи.



Рисунок 1. Полутоновый (слева) и бинарный (справа) варианты представления статической подписи человека

– упрощение процесса сравнения: для задач, связанных с распознаванием и сопоставлением, бинарные изображения легче поддаются сравнительному анализу, так как каждая точка может иметь только два значения (черный и белый), что позволяет использовать более простые алгоритмы;

– снижение вычислительной сложности: полутоновые и цветные изображения требуют больше вычислительных ресурсов для обработки, что может быть нецелесообразно для задач, связанных с анализом формы на цифровых изображениях подписи,

и может быть критичным при обработке большого количества подписей.

Оценка качества биометрических данных – важный и сложный [1, 16], с практической точки зрения, процесс. Его можно проводить на разных этапах:

– при регистрации образца подписи в первый раз или его обновления в уже имеющейся базе данных (БД). Качество шаблонов можно контролировать, выполняя их регистрацию до тех пор, пока они не будут соответствовать заданным критериям качества, при этом можно менять пишущий инструмент или настройки сканирования;

– после корректировки или обработки изображения, например, после выполнения поворота или масштабирования образца подписи, при выборе метода бинаризации;

– при вычислении признаков подписи на изображении в областях только хорошего качества.

Все перечисленные этапы требуют исследований и новых решений, поскольку они недостаточно изучены в сравнении с основной задачей извлечения признаков в системах распознавания [1]. В данной статье рассматривается задача безэталонной оценки качества статической подписи (выполненной разными ручками), отсканированной и преобразованной в бинарное изображение. При этом динамическая информация (наклон, давление и положение ручки) не учитывается.

Факторы, влияющие на качество цифровых изображений статических подписей

Факторы, которые могут оказывать влияние на качество изображения статической подписи:

1. Параметры пишущего предмета, сканирования, хранения и передачи изображения: фон, тип бумаги, цвет ручки, яркость, контраст, разрешение (dpi – точки на дюйм), формат файла и его степень сжатия.

Ограничения по объему хранения или скорости обмена данными могут оказывать влияние на алгоритмы сжатия данных – например, в случае использования смарт-карт. Слишком сильная степень сжатия может вносить искажения, давать потерю информации и приводить к визуальным артефактам. Поэтому регулирующие органы или международные организации по стандартизации могут указать, что биометрические данные должны храниться в необработанном виде (а не в виде обработанных шаблонов, которые могут зависеть от алгоритмов обработки), что может повлиять на размер данных. Таким образом, влияние сжатия данных на производительность распознавания становится критически важным [2].

Разрешение изображения подписи должно быть достаточно высоким, чтобы корректно отобразить все детали подписи. Высокое разрешение

изображения позволяет сохранить больше деталей подписи, что важно для точного распознавания. Однако слишком высокое значение при сканировании добавляет лишнюю информацию на изображение подписи, например, проявляется текстура бумаги. В свою очередь слишком низкое разрешение может привести к потере информации и затруднить дальнейший анализ. Уровень контраста на исходном полутоновом или цветном изображении между фоном и подписью должен быть достаточным для чёткого различения подписи. Например, подписи, выполненные карандашом, имеют недостаточный контраст, что затрудняет выполнение бинаризации стандартными методами, например, методом Отсу (рисунок 26 – результат бинаризации изображения подписи методом Отсу).

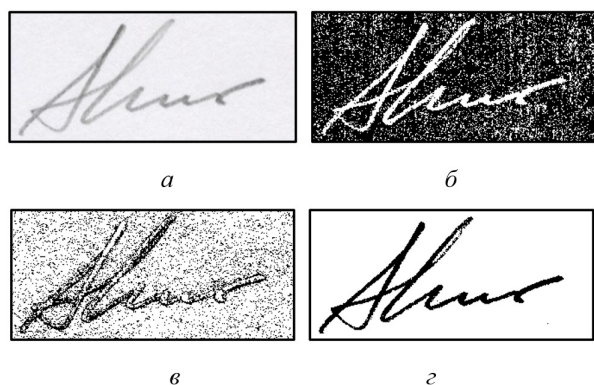


Рисунок 2. Исходное изображение статической подписи, выполненной карандашом, и результат бинаризации снимка разными методами

Такие искажения, как наклон, деформация и загибы бумаги при сканировании, также могут повлиять на качество изображения подписи, создавая затемненные или размытые участки, затрудняя дальнейшую обработку. Таким образом, важно обеспечить сбалансированный выбор настроек сканирования, поскольку неверные параметры могут привести как к искажению, так и к потере деталей на изображении.

2. Физиологические и поведенческие факторы: поза (сидя или стоя, с опорой или без), состояние человека (болезнь, возраст, нарушение зрения, травма, усталость, нервозность, заинтересованность и мотивация) [2, 12]. Эти составляющие могут оказывать влияние на темп написания и концентрацию человека, в результате чего подпись может быть выполнена либо четко и уверенно, либо нечитаемой.

Некоторые из вышеперечисленных факторов можно контролировать. Поэтому важно оценивать качество получаемого образца подписи. Это может помочь вовремя предпринять корректирующие действия, такие как выбор подходящего алгоритма для обработки, техобслуживание оборудования или другая помощь специалиста.

Результаты экспериментального исследования и предлагаемый подход к безэталонной оценке качества изображения подписи

В рамках данного исследования рассматривалась задача оценки качества изображения статической подписи, когда отсутствует эталонный образец, а изображение признавалось неудовлетворительным, если содержало много разрывов в элементах подписи или шум (рисунок 3). Наличие таких характеристик может привести к снижению точности, затруднить последующую интерпретацию и анализ образца (рисунок 3).

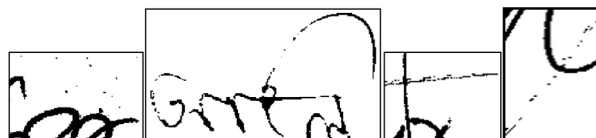


Рисунок 3. Пример разрывов линий подписи и наличия шума

Экспериментальные исследования были проведены с использованием цветных, полутоновых и бинарных изображений, представленных в базах CEDAR [13], BHSig260-Bengali [21], SigComp2009 [22], а также изображений, полученных белорусскими исследователями. Последние изображения были записаны в формате jpeg с разрешением 300 dpi, с высотой от 300 до 600 пикселей и шириной от 420 до 1145 пикселей, для выполнения подписи были использованы ручки с синими чернилами. Примеры цветных изображений из данной базы представлены на рисунке 4.

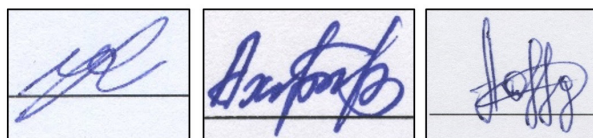


Рисунок 4. Примеры цветных изображений подписей

База CEDAR содержит 2640 изображений разного размера (от 264x277 пикселей до 888x816 пикселей). Некоторые изображения этой базы выглядят как полутоновые, а записаны как цветные (с одинаковыми RGB-каналами). Данная база включает в себя подписи 55 человек: 1320 подлинных и 1320 поддельных образцов (по 24 для каждого автора). Подделки созданы опытными фальсификаторами. Выполненные на бумаге подписи были отсканированы с разрешением 300 dpi и сохранены в формате png. Авторы подписей просили подписать документы в заранее определённой области размером 2x2 дюйма. На рисунке 5 показан один образец для каждого из 55 авторов подписей базы.



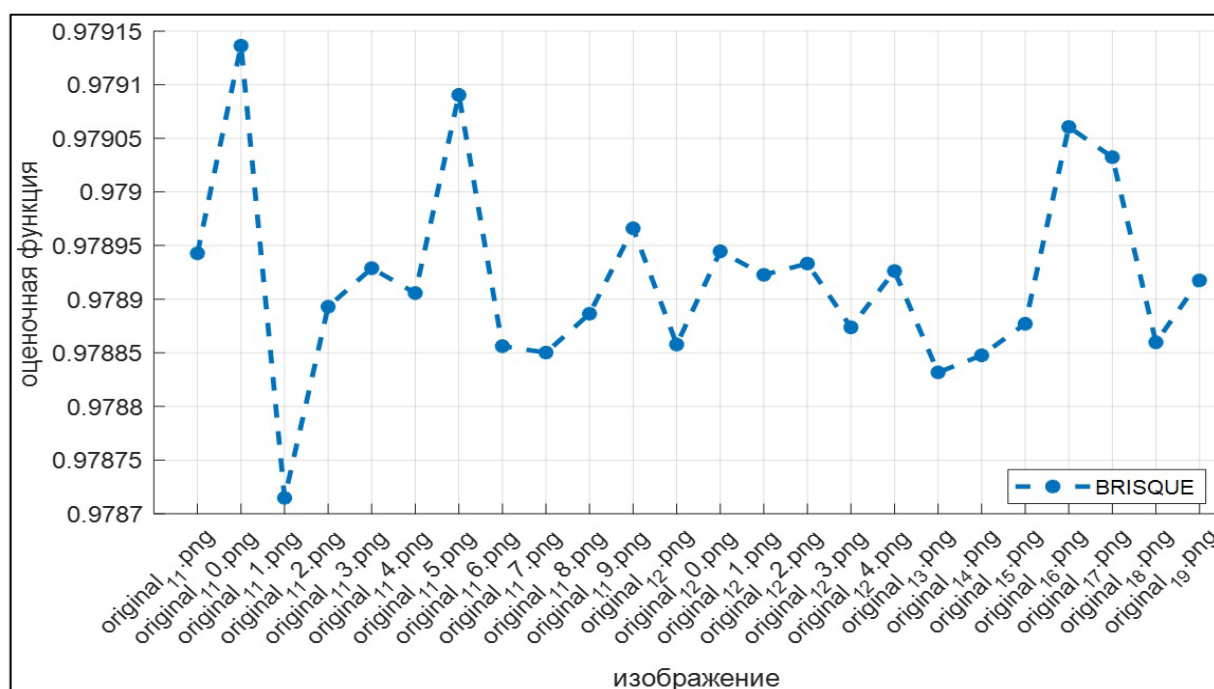
Рисунок 5. Образец подписи каждого из 55 авторов, база изображений CEDAR

База BHSig260-Bengali (используется бенгальский язык или бенгали) содержит 5400 статических подписей 100 человек, включая 24 подлинных и 30 поддельных подписей для каждого человека. Собранные данные были отсканированы с помощью планшетного сканера с разрешением 300 dpi в полутоновом режиме и сохранены в формате tiff. Авторами базы для бинаризации использовано пороговое преобразование гистограммы. Размер изображения составляет от 904x238 пикселей до 1032x285 пикселей.

База цифровых изображений подписей SigComp2009 содержит одновременно полученные онлайн и офлайн образцы подписей. В экспериментах использован второй набор данных (1524 изображения: 940 оригинальных подписей и 624 – подделки), в котором представлены отсканированные подписи после бинаризации, сохраненные в формате png с разрешением 600 dpi.

Предлагаемый подход к оценке качества изображения статической подписи

Для оценки качества цветных и полутоновых изображений подписей было выбрано несколько безэталонных оценочных функций (BEGH, GORD, GRAE [23]), используемых для анализа контраста и резкости, в том числе BRISQUE, встроенную в программную среду MATLAB. Эксперименты показали, что значения количественных оценок не соответствовали визуальной, поэтому в данной ситуации их не целесообразно использовать для анализа цифрового изображения статической подписи. Графики количественной оценки BRISQUE для двадцати четырех подлинных и поддельных подписей представлены на рисунке 6. Некоторые изображения, выбранные для эксперимента, были малоконтрастными или имели размытость контура подписи (рисунок 1, слева).



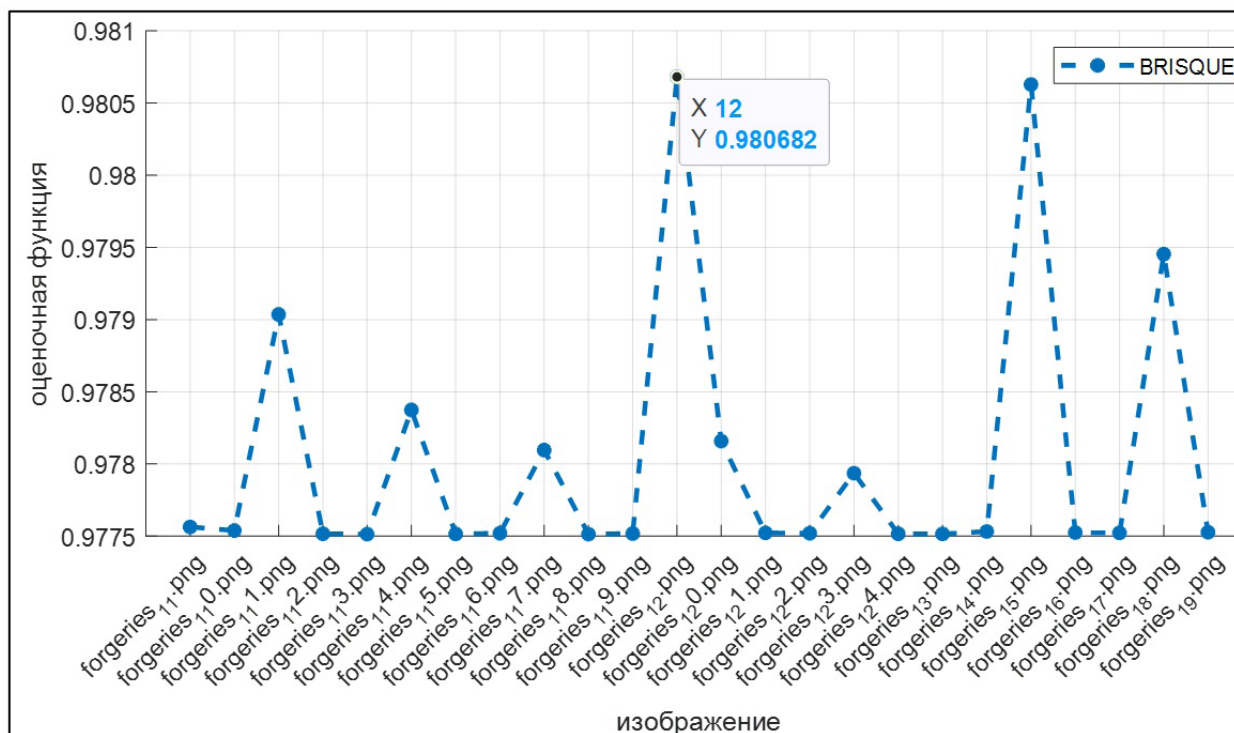


Рисунок 6. Графики количественной оценки BRISQUE для подлинных и поддельных подписей одного человека, база CEDAR

На графиках рисунка 6 можно заметить, что разделить изображения на два класса (удовлетворительные и неудовлетворительные) затруднительно.

В ходе экспериментального исследования был сделан вывод, что целесообразно автоматическую безэталонную оценку качества изображения статической подписи выполнять на бинарных изображениях, переводя цветные и полутоновые изображения в двоичное представление.

На основании проведенных экспериментов и анализа литературных источников предлагается новый подход к оценке качества цифровых изображений подписи, который включает в себя пять этапов:

1. Перевести цветное или полутоновое изображение в бинарное представление (рисунок 7).

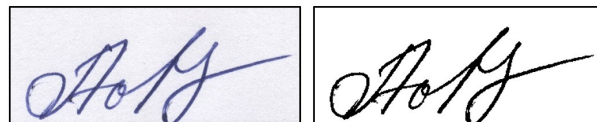


Рисунок 7. Цветное изображение подписи и результат его бинаризации (метод Отсу)

2. На бинарном изображении удалить шум в виде черных точек размером в несколько пикселей и избыточный фон вокруг подписи, выходящий за границы описывающего ее прямоугольника (рисунок 8).

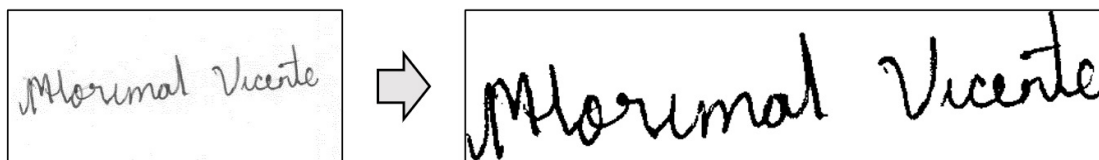


Рисунок 8. Пример удалением шума и предобработки изображения подписи

На данном этапе алгоритма размер, полученных изображений из используемых баз, составлял от 172x275 пикселей до 819x629 пикселей. Если изображение слишком маленького размера, получить достоверные признаки подписи будет невозможно. Поэтому такие изображения необходимо отсеивать на данном этапе.

3. Найти все связные компоненты на бинарном изображении статической подписи, полученном на предыдущем этапе, и вычислить их площади, записав полученные значения в вектор *area*.

4. Вычислить среднее (mean) и медианное (median) значения для полученного вектора *area*.

5. Найти количество связанных компонент ($count_small$), площадь которых меньше, чем $mean * tr1$ или $median/2$. Если $count_small$ больше порога $tr2$, то изображение относится к классу неудовлетворительного качества.

Значения параметров для морфологических операций и фильтрации бинарного изображения подписи, а также пороги $tr1$ и $tr2$ настраиваются в соответствии с базой изображений и особенностями работы алгоритмов, используемых для дальнейшего анализа подписи. Стоит отметить, что подписи могут быть выполнены разными пишущими предметами при разнообразных условиях

и способах оцифровки статической подписи. В результате чего, варьируется фон на изображениях, толщина линии и другие характеристики. Кроме того, длина и общее количество связанных компонент подписи могут изменяться в зависимости от этнического происхождения человека и его языковой группы [1, 2, 24]. На рисунке 9 представлены бинарные изображения из трех баз, в которых представлены подписи с разной толщиной линий. В таблице собраны данные для нескольких наборов изображений и можно заметить, что значения параметров (количество связанных компонент и их площадь) варьируются.

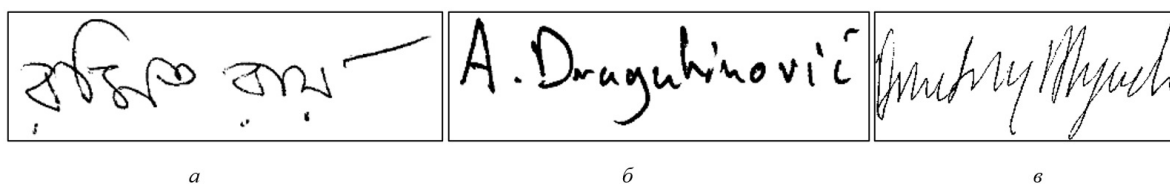


Рисунок 9. Примеры бинарных изображений из разных баз: а – BHSig260-Bengali, б – SigComp2009, в – CEDAR

Таблица. Сводная таблица для нескольких баз изображений подписей

Параметры	База BHSig260-Bengali				База SigComp2009				База CEDAR		Белорусская база	
	подделки		подлинные		подделки		подлинные		для всех изображений сразу		подлинные	
	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
Mean (area)	579	8464	80	5366	1156	95049	999	91548	125	14231	1143	57934
Median (area)	186	8464	27	5366	49	95049	51	91548	10	14231	9	57934
Количество связанных компонент подписей, $count_comp$	2	11	2	44	1	28	1	20	1	31	1	28

Примечание: среднее (mean) и медианное (median) значения были вычислены для всей базы.

Например, максимальное количество связанных компонент одной подписи ($count_comp$) в базе BHSig260-Bengali составляет 44, в то время как для базы CEDAR – 31. В базе SigComp2009 лишь 2,6 % изображений имеют количество связанных компонент, превышающее 10. Для базы BHSig260-Bengali почти треть всех подлинных подписей содержит больше 10 компонентов. Кроме того, в базе SigComp2009 максимальное значение средней площади для оригинальных подписей больше в 17 раз, чем в базе BHSig260-Bengali, что свидетельствует о том, что площадь связанных компонент одной подписи может значительно отличаться у различных баз.

Экспериментальный анализ показал, что подпись одного человека, выполненная несколько раз,

может иметь разное количество связанных компонент. На рисунке 10 показано несколько изображений одной подписи. Можно заметить, что количество компонент – разное и чем больше разрывов, тем хуже качество изображения. Однако простое пороговое разделение изображений на два класса качества по количеству компонент не целесообразно использовать, т. к. не дает стабильных результатов.

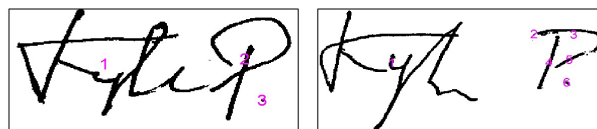


Рисунок 10. Бинарные изображения одной подписи, выполненной дважды

На этапе бинаризации изображения подписи важно автоматически оценить качество получаемого результата на предмет его пригодности для дальнейшего анализа. Если качество оказывается неудовлетворительным, необходимо изменить метод или параметры бинаризации, а затем повторить процедуру. Если подпись на изображении четкая и расположена на однородном, достаточно контрастном фоне, рекомендуется применять метод Оцу с расчетом глобального порога (рисунок 7), который дает хорошие результаты в этом случае. В противном случае стоит использовать метод адаптивной бинаризации.

После выполнения бинаризации на изображении могут появиться шумы, которые можно удалить с помощью морфологических операций, фильтрации и других методов. В ходе исследования было выявлено, что на втором этапе, описанного выше подхода оценки качества изображения подписи, целесообразно последовательно исполь-

зовать функции *bwareaopen* (применяется в среде MATLAB для удаления объектов на бинарном изображении, содержащих менее заданного количества пикселей P), *imclose* (морфологическая операция закрытия с использованием заданной маски, применяется для заполнения отверстий и сглаживания границ), а затем медианную фильтрацию. На рисунке 11 представлен результат выполнения морфологических операций *bwareaopen* и *imclose* (рисунок 11б)), а также медианной фильтрации (рисунок 11в)). Эксперименты показали, что для операции открытия следует использовать P равное 8 с использованием 8-связной структуры, а для операции закрытия – круг размером 1. Применение этих операций обеспечивает более гладкий контур и более точный скелет. На рисунке 11 первых три фрагмента – это изображения белорусской базы, следующие три фрагмента – изображения базы BHSig260-Bengali. На представленных фрагментах можно заметить, что толщина линий у подписей разная.

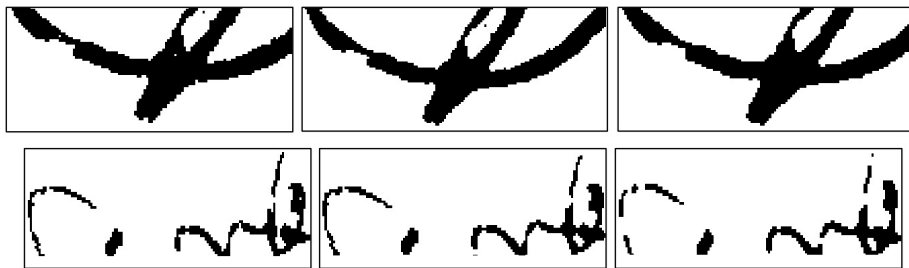


Рисунок 11. Результат морфологических операций и медианной фильтрации: а – фрагмент бинарного изображения подписи, б – результат морфологических операций, в – результат морфологических операций и медианной фильтрации (3x3)

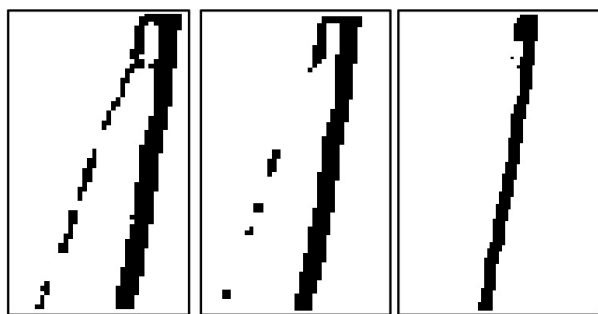


Рисунок 12. Результат морфологических операций и медианной фильтрации: а – фрагмент бинарного изображения подписи (база CEDAR) после морфологических операций, б – результат морфологических операций и медианной фильтрации (3x3), в – результат морфологических операций и медианной фильтрации (5x5)

Избыточное применение морфологических операций и медианной фильтрации на цифровых бинарных изображениях может привести к нежелательным результатам, таким как слияние или разъединение значимых фрагментов и элементов подписи.

Медианный фильтр большого размера не является оптимальным выбором для изображений, на которых подпись выполнена тонкой ручкой, например, изображения базы CEDAR (рисунок 12). Данная фильтрация может вызывать разрывы тонких линий и увеличение количества связанных компонент, что, в свою очередь, создает ложные контуры и элементы скелета, негативно влияя на качество изображения. Напротив, для баз данных, содержащих подписи, выполненные толстым стержнем, использование медианной фильтрации может быть оправданным (рисунок 11 верхний ряд изображений). Для изображений белорусской базы можно использовать медианный фильтр, размер которого превышает размер, применяемый для базы CEDAR. Это можно отметить на рисунках 11–12, а также анализируя средние значения площадей связанных компонент для этих наборов данных в таблице 1. В частности, максимальное значение площади различается в четыре раза. Поэтому выбор метода обработки изображений должен основываться на характеристиках подписей и условиях их выполнения.

Заключение

В рамках данного исследования была поставлена задача оценки качества статических подписей без использования эталонных образцов. Если на изображении были множественные разрывы подписи или лишний шум, оно считалось неудовлетворительным из-за невозможности дальнейшего точного анализа. Эксперименты проводились с использованием нескольких баз данных (CEDAR, BHSig260-Bengali, SigComp2009 и изображения, полученные в рамках данного исследования), в которых содержались подписи, выполненные в разных условиях и разными ручками. Для оценки качества был предложен новый подход, состоящий из нескольких этапов: преобразование изображения в бинарное представление, удаление шума, поиск связанных компонент и анализ их площадей. Исследования показали, что применение различных методов бинаризации и фильтрации изображений может привести к нежелательным результатам, например, слиянию или удалению некоторых

элементов подписи. Важно выбирать подходящие параметры обработки в соответствии с условиями создания подписей. Предложенный подход может быть применим для устранения изображений низкого качества на этапе регистрации подписи, при выборе метода ее обработки или улучшения, если качество полученного образца неудовлетворительное. Полученные результаты подчеркивают необходимость дальнейших разработок в данной области, направленных на усовершенствование алгоритмов оценки качества и повышение точности распознавания подписей, что в итоге позволит автоматизировать трудоемкий и дорогостоящий процесс экспертизы, минимизируя влияние человеческого фактора и повышая надежность биометрической идентификации и верификации в государственных или коммерческих организациях.

Благодарности

Работа выполнена в рамках НИР пер. № НИОКТР 20241508.

REFERENCES

1. **Fernandez F.A.** Biometric sample quality and its application to multimodal authentication systems. Universidad Politecnica de Madrid. Madrid, Spain. 2008. 50 p.
2. **Fairhurst M.** Signature verification revisited: promoting practical exploitation of biometric technology. *Electronics and Communication Engineering Journal*. 1997. Vol. 9. Pp. 273-280.
3. **Jain A., Ross A., Prabhakar S.** An introduction to biometric recognition // *IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology*. 2004. Vol. 14. № 1. Pp. 4-20.
4. **Plamondon R., Srihari S.N.** On-line and off-line handwriting recognition: a comprehensive survey. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 2020. Vol. 22. № 1. Pp. 63-84. DOI: 10.1109/34.824821
5. **Yogesh G., Patil A.** Offline and online signature verification systems: A survey. *International Journal of Research in Engineering and Technology*. 2014. Vol. 3. № 3. Pp. 328-332.
6. **Alonso-Fernandez F., Fierrez J., Ortega-Garcia J.** Quality measures in biometric systems. *IEEE Security & Privacy Magazine*. 2011. Vol. 9. № 4. Pp. 34-41. DOI: 10.1109/msp.2011.178
7. **Hameed M.M. et al.** Off Sig-Sin GAN: A Deep Learning-Based Image Augmentation Model for Offline Signature Verification. *Computers, Materials & Continua*. 2023. Vol. 76. № 1. Pp. 1-15.
8. **Hafemann L.G., Sabourin R., Oliveira L.S.** Offline handwritten signature verification – Literature review. 2017 seventh international conference on image processing theory, tools and applications (IPTA). IEEE. 2017. Pp. 1-8.
9. **Jain A., Flynn P., Ross A. (eds.)** Handbook of biometrics. Springer, 2008. 694 p.
10. **Bouridane A., Shafique M.** Signature verification and recognition: A review. In *Handbook of research on image and video processing*. 2008. Pp. 531-558.
11. **Alonso-Fernandez F., Fierrez J., Ortega-Garcia J.** Quality Measures in Biometric System. *IEEE Security & Privacy*. 2012. Vol. 10. № 6. Pp. 52-62. DOI: 10.1109/MSP.2011.178
12. **Benini S.** Biometric sample quality standards: Applications, status, and direction. *Proc. NIST Biometric Quality Workshop*. Gaithersburg, MD, USA, November 7-8, 2007.
13. **Kalera M.K., Srihari S., Xu A.** Offline signature verification and identification using distance statistics. *International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence*. 2004. Vol. 18. Pp. 1339-1360.
14. **Pal S. et al.** Performance of an off-line signature verification method based on texture features on a large indic-script signature dataset. 2016 12th IAPR Workshop on Document Analysis Systems (DAS). IEEE. 2016. Pp. 72-77.
15. **Blankers V.L., van den Heuvel C.E., Franke K.Y., Vuurpijl L.G.** Icdar 2009 signature verification competition. In: *Proceedings of the International Conference on Document Analysis and Recognition*. 2009. Pp. 1403-1407.
16. **Golub Y.I., Starovoitov V.V.** Image quality assessment. Minsk: UIIP NAS Belarus. 2023. 252 p.
17. **Finogeev E.L., Terehova Y.V.** Investigation of the dependence of the accuracy of recognition of handwritten signatures from the language group using deep neural networks. The second international scientific and practical forum on economic security "VII VSKEB". 2021. Pp. 97-104

NO-REFERENCE DIGITAL IMAGE QUALITY ASSESSMENT OF OFFLINE SIGNATURE

*United institute of informatics problems of the National Academy of Sciences of Belarus
Minsk, Republic of Belarus*

The purpose of this paper is to develop a simple criterion for image quality assessment of a signature scanned from a paper (i. e., a static or offline signature). A new approach to no-reference assessment of the quality of a binary signature image is proposed, which can be useful as a tool for monitoring signature samples in biometric recognition systems to control data quality. For example, it can be used during image registration, selection of processing methods and its parameters adjustment, after performing various operations (such as rotation or scaling) and the need to evaluate and analyze the obtained signature images. The paper also describes factors that can negatively affect the quality of a static signature. The experimental analysis was performed on digital images of signatures available in the CEDAR, BHSig260-Bengali, SigComp2009 databases and images collected during the research.

Keywords: *biometric system, binary image, digital image of human signature, image quality assessment of binary image, handwriting signature*



Голуб Юлия Игоревна, кандидат технических наук, доцент, ведущий научный сотрудник государственного научного учреждения «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси».

Yuliya I. Golub, PhD, Associate Professor, Leading Researcher at the United Institute of Informatics Problems, National Academy of Sciences of Belarus.

О ЖУРНАЛЕ

Международный научно-технический журнал «Системный анализ и прикладная информатика» издается 4 раза в год, на русском и английском языке. Распространяется на территории Беларуси, России и странах СНГ. В журнале публикуются статьи по системному анализу, программному обеспечению информационных технологий, хранению и обработке данных, защите информации, применению информационных технологий в образовательном процессе.

Журнал «Системный анализ и прикладная информатика» является отличной площадкой для продвижения результатов научных исследований не только известных, но и начинающих исследователей. Журнал включен в крупнейшие базы данных научного цитирования РИНЦ, eLIBRARY.RU, ЭБС «Лань», Google Scholar, НЭБ «КиберЛенинка», EBSCO, BASE Search, OpenAIRE, WorldCat, OpenDOAR, ROAR которые признаны авторитетными для мирового научного сообщества.

Подписаться на журнал можно через подписные каталоги:
РУП «Белпочта», ООО «Прессинформ», ООО «Криэйтив Сервис Бэнд»,
ООО «Екатеринбург-Опт», ООО «Глобалпресс»

Подписной индекс журнала «Системный анализ и прикладная информатика»:
Ведомственный – 013902 Индивидуальный – 01390

Также предлагаем услуги по размещению рекламы в журнале «Системный анализ и прикладная информатика»

Вид рекламного модуля	Для Республики Беларусь Стоимость в бел. руб. с НДС	Для стран СНГ Стоимость в рос. руб.
На обложке (стр.2,3) полноцветный	689,88	26975
Внутри журнала (формат 1/1), полноцветный	536,49	20950
Внутри журнала (формат 1/2), полноцветный	263,27	11235
Внутри журнала (формат 1/1), черно-белый	363,10	11235
Внутри журнала (формат 1/2), черно-белый	181,56	5390

Размещение рекламы в очередном номере осуществляется
после предварительной оплаты Заказчиком
Информацию для рекламодателей можно получить по тел. (+375) 44 566 47 88,
email: l.katkova@bntu.by

Адрес и телефоны редакции:
Республика Беларусь, г. Минск, 220013, пр. Независимости, 65
тел. +375 17 266 26 58
www.sapi.bntu.by
email: ca_pi@bntu.by
