

Моделювання поверхні зовнішніх обводів корпусу судна в системі “ДЕЙМОС”

Корпус судна, як і корпуси деяких інших транспортних апаратів (літака, ракети тощо), можна розглядати як перелік якихось геометричних об'єктів (ГО), перев'язаних між собою. Головними об'єктами для моделювання поверхні зовнішньої обшивки корпусу судна є поверхні. У статті розглянуті типи поверхонь корпусу судна та алгоритми їх створення. Наведені приклади реалізації каркасної поверхні.

Hull of ship, that hull of any transport's apparatus (plane, rocket etc.) may be looked how set of linked Geometrical Objects (GO). Main objects for modeling shell of hull are surfaces. In this article describe types and algorithms of creating surfaces. There are examples of realization of frame surface.

Загальна постановка проблеми та її зв'язок з науково-практичними задачами

Задача створення математичної моделі поверхні зовнішніх обведень судна завжди була однією з центральних для всіх САПР у суднобудуванні з тієї простої причини, що від геометрії корпусу залежить практично усе – починаючи від ходових якостей судна і закінчуючи технологією побудови. У той же час дану задачу ніяк не можна віднести до розряду тривіальних і таких, що легко алгоритмізуються. Побудова поверхні в автоматичному режимі – це лише мрія, здійснити яку найближчим часом навряд чи вдасться. Усі відомі сучасні системи проектування орієнтовані лише на автоматизований режим побудови поверхонь, тобто режим діалогу за участю людини. Проблема, крім іншого, полягає у переліку таких необхідних умов, що важко формалізуються і яким зобов'язана задовольняти створювана модель поверхні. На думку багатьох, причому дуже кваліфікованих і досвідчених фахівців у галузі створення поверхонь зовнішніх обводів [1; 2; 3; 4; 5; 6; 7], рішення даної задачі, навіть з обліком усіх наявних на даний момент могутніх комп'ютерних

засобів і алгоритмів, усе ще продовжує залишатися скоріше мистецтвом, ніж процесом, що допускає формалізацію й алгоритмізацію. Мова, отже, може йти лише про розробку придатних інструментів, що полегшують кваліфікованому користувачеві розв'язання задачі. В основному, тут мається на увазі звільнення такого користувача, по можливості, від великої кількості рутинних, тривіальних операцій, що віднімають у нього багато сил і часу. Крім того, велику роль відіграє процес навчання фахівців, що володіють усім необхідним досвідом створення поверхні зовнішніх обведень судна. Потрібно відмітити, що автоматизація проектування суден складає важливу компоненту програми розвитку суднобудування в Україні та Закону України „Про заходи щодо державної підтримки суднобудівної промисловості в Україні” (№1242-XIV від 18 листопада 1999 року із змінами, внесеними згідно із Законом № 2892-III (2892-14) від 13.12.2001).

Огляд публікацій та аналіз невирішених проблем

У процесі розробки системи автоматизованого проектування корпусу судна ДЕЙМОС [3; 4], яка виконувалася за

участю авторів статті, був проаналізований досвід роботи декількох підприємств, що займаються проектуванням суден і кораблів (Чорноморсуднопроект, Завод 61 Комунара, Завод Damen Shipyards Okean, завод „Протока”, НДІ „Центр”).

Основними відомими системами автоматизованого проектування САПР в суднобудуванні є:

FORAN – спеціалізована суднобудівна система проектування, яка була розроблена фірмою SENER INGENIERIA Y SISTEMAS S.A., Іспанія.

TRIBON – спеціалізована суднобудівна система проектування, яка була розроблена фірмою TRIBON SOLUTIONS (в минулому Kockums Computer Systems), Швеція.

NUPAS-CADMATIC – спеціалізована суднобудівна система проектування, яка була розроблена та підтримувана зараз компаніями NUMERIEK CENTRUM GRONINGEN B.V., Голландія, і CADMATIC Ltd., Фінляндія.

CATIA – спеціалізована суднобудівна система проектування, яка була розроблена фірмою DASSAULT SYSTEMES, Франція, при підтримці корпорації IBM, США. Зараз анонсується як система, що враховує специфіку проектування у суднобудуванні.

AutoSHIP – спеціалізована суднобудівна система проектування, яка була розроблена фірмою AUTOSHIP SYSTEMS CORPORATION, Канада.

Деймос – інтегрована автоматизована система деталювання і моделювання корпусу судна, розроблена в НДІ „Центр”, Миколаїв, Україна.

ShipModel – програмний комплекс для суднобудування.

DEFCAR – спеціалізована суднобудівна система проектування, яка була розроблена фірмою DEFCAR Eng., Іспанія.

NAPA – спеціалізована суднобудівна система проектування, яка була розроблена фірмою Napa Oy, Фінляндія.

K3-SHIP – комплекс програм тривимірного моделювання для суднобудування, що був розроблений

НОЦ "ГеоС", Росія.

Sea Solution – спеціалізований програмний комплекс, що був розроблений компанією SeaTech Ltd., Росія.

Задача моделювання у кожній з цих систем вирішується по-різному – в деяких системах (**FORAN, TRIBON**) існує топологічна параметризована модель корпусу судна, і в цих системах можна згладжувати поверхню, змінюючи один чи декілька параметрів і перебудовуючи всю поверхню. В **K3-SHIP** – спочатку згладжують окремі лінії і потім моделюють поверхню, натягуючи її на вже згладжені лінії. В системі Деймос існує можливість сгладжування окремих ліній, і потім, використовуючи ці лінії, можна будувати складену згладжену поверхню. Але ж можна будувати й окремі елементи поверхні, що згладжуються автоматично (при завданні первинних даних вказуються певні допуски та напрямки, в яких можливі зміни координат опірних точок). Зрозуміло, що внутрішні моделі даних систем та математичні апарати, які функціонують на цих системах, є „НОУ-ХАУ”. Але ж всі ці системи повинні при найменших діях користувача сформувати модель поверхні судна, яка б як можна точніше відображала корпус судна, і при тому була б невеликою. Крім того, математичний апарат повинен ефективно працювати з цією моделлю.

Для того, щоб за первинними даними сформувати модель корпусу судна та щоб модель була не перевантажена, існує таке рішення: спочатку виділяються прості типи поверхонь, які не потребують сгладжування (площина, циліндрична, лінійчата поверхні...). Математичні моделі та апарати для цих поверхонь досить прості й ефективні. А потім вони повинні бути гладко стиковані. Для цього і потрібна каркасна поверхня, будовання якої повинно мати можливість завдання граничних параметрів. При цьому від користувача системи треба запрошувати мінімальні дії – він повинен вказати каркасні лінії та вказати поверхні і спосіб стиковки з цими поверхнями.

Мета досліджень

Як було наведено вище, публікацій щодо розв’язання задачі стикування поверхонь різних типів практично не існує. Таким чином, метою даного дослідження є створення програмного комплексу, який буде спроможний при мінімальних діях користувача автоматично створювати об’єкт „каркасна поверхня” з можливістю гладкого стикування з іншими поверхнями.

Результати досліджень

Розглянемо коротко основні інструменти для побудови поверхонь у системі ДЕЙМОС. Насамперед, у системі розроблений ряд операторів побудови поверхонь спеціальних типів (циліндричного, кінематичного, лінійчатих, типу труби й інші). Очевидно, що тільки таких поверхонь для створення всієї поверхні корпусу зовсім недостатньо. Ці поверхні, а також і плоскі поверхні, можуть описувати лише окремі, локальні фрагменти загальної складеної поверхні. Недостатність тільки таких типів поверхонь видна з неможливості, у загальному випадку, вирішити задачу гладкого стикування елементів поверхонь спеціальних типів. Отже, необхідний тип «загальної локальної поверхні», форма якої не важко

$$R(p, q) = \sum_{i=1}^M A_i(p)R(p_i, q) + \sum_{j=1}^N B_j(q)R(p, q_j) - \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N \bar{R}(p_i, q_j) A_i(p) B_j(q). \quad (1)$$

поверхонь. Як така поверхня в системі існує так звана «каркасна поверхня». Зупинимося на суті математичної моделі поверхні даного типу.

Основна формула, що визначає геометрію каркасної поверхні, має вигляд:

$$p_0 \leq p \leq p_M,$$

$$q_0 \leq q \leq q_N,$$

Тут – радіус-вектор точки поверхні як функція криволінійних

координат p, q $A_i(p_k) = \delta_{ik}$, поверхні (далі названих «параметрами»),

при цьому $B_j(q_l) = \delta_{jl}$.

$$\bar{R}(p_i, q)$$

$A_i(p)B_j(q)$ – фундаментальні кубічні сплайни на сітці (p_i, q_j)

$$\bar{R}(p_i, q_j)$$

тобто виконуються співвідношення

Далі, – поперечні каркасні лінії, що є параметричними кубічними сплайнами (тут змінний параметр – q).

Аналогічно, – поздовжні каркасні лінії, змінний параметр для них – p . Ці лінії перетинаються, що знаходить висвітлення у використовуваних нами позначеннях: точки перетинання мають радіус – вектори

Поверхні даного типу відомі в обчислювальній геометрії як поверхні Гордона. Ці поверхні будуються по сітці гладких ліній двох напрямків – поздовжньому і поперечному. Поверхня Гордона точно проходить через каркасні лінії, у чому можна переконатися, підставляючи в основну формулу значення $p = p_i$ та $q = q_j$. Однак цього для наших цілей недостатньо. Поверхня Гордона повинна бути доповнена можливістю гладкого стикування з іншими поверхнями уздовж граничних каркасних ліній.

Більш того, практика показує, що умова гладкого стику з іншими поверхнями може задаватися не по всій граничній лінії, а упереміж по окремих не зв’язаних між собою ділянках границі.

З метою врахування цих вимог у системі прийнятий на озброєння модифікований варіант поверхні Гордона, що забезпечує необхідне гладке стикування. Загальна формула, що вирішує цю задачу, занадто складна, тому в рамках даної статті

зупинимося лише на основній ідеї її виводу.

Відомо, що інтерполяційним формулам відповідають так звані проєкційні оператори. Так, наприклад, інтерполяція кубічними сплайнами задається формулою

де $A_i(p)$ – описані вище фундаментальні сплайни.

Оператор P , обумовлений формулою (2), є проєкційним, тобто $P^2 = P$.

У свою чергу, інтерполяції по перемінній q відповідає оператор Q , з аналогічною властивістю $Q^2 = Q$.

Оператори P і Q комутують $PQ = QP$.

Звідси легко виводиться важливий висновок: оператор $S = P + Q - PQ$ також є проєкційним. Це очевидно, до речі, з іншого запису цього оператора:

$$S = I - (I - P)(I - Q).$$

Тому оператор S як проєкційний визначає деяку інтерполяційну формулу. Проста перевірка показує, що дана формула збігається з вихідною формулою (1) для поверхні Гордона. Така схована структура, що лежить в основі поверхні типу Гордона, дозволяє побудувати необхідне їй узагальнення. Досить замінити формулу (2) на формулу, що відповідає кубічній інтерполяції з урахуванням крайових умов, і тоді оператор S дасть нам необхідну, більш загальну, формулу.

Помітимо також, що через їхню громіздкість безпосередні обчислення за цими формулами проводити недоцільно, і в системі виробляється перетворення поверхні Гордона в більш легко обчислювану поверхню – до бікубічного параметричного сплайну.

Другий необхідний інструмент, без якого створення поверхні зовнішніх обведень неможливо, – це оператори побудови ліній у просторі.

Задача протягання гладкої лінії по точках вирішена давно [8]. Рішення дають кубічні сплайни – спеціальний винахід математиків для моделювання

властивостей пружної гнучкої рейки [9]. Однак в умовах реальної практики виявляється, що апарата створення сплайнів по точках явно недостатньо. Більш реальною представляється інша постановка задачі, коли сплайни зобов'язані не точно проходити через задані точки, а можуть довільно відхилитися від них у межах заданих «коридорів» із відомими допусками. Таким чином, ми маємо не просту задачу на мінімум пружної енергії сплайну, а задачу з обмеженнями. У загально-математичному плані мова йде про задачу мінімізації квадратичної функції на опуклій множині, обумовленій заданою множиною «коридорів» і допусків. Характер цього формулювання зовсім не зміниться, якщо ми поставимо перед собою більш важку задачу – спільного згладжування довільного набору просторових сплайнів, з обліком можливих взаємних перетинань усіх цих ліній. Як впливає з „Методики побудови складеної поверхні” [4], тільки таке спільне згладжування може давати гарантії успіху в справі побудови прийнятних каркасних поверхонь.

Зупинимося коротенько на математичному підході до розв'язання цієї задачі. Мінімізація квадратичного функціонала на опуклій множині – це одна зі стандартних задач оптимізації, для рішення якої може бути застосований практично кожний з відомих методів. Найбільше підходить для цієї мети метод проєкції градієнта. Суть цього методу описана в стандартних посібниках з чисельних методів рішення задач оптимізації, наприклад [10; 11], і тут вона викладатися не буде.

Однак, коли подібний метод був фактично застосований до задачі згладжування окремої лінії, виявився істотний недолік методу: малоістотні варіації у вихідних даних приводили в окремих випадках до знезацька різкого збільшення числа ітерацій методу, від 10-20 до декількох десятків тисяч. Зрештою, причиною цього явища виявилася погана збіжність градієнтного методу мінімізації.

Тому, із метою подолання зазначених труднощів, при розробці САПР ДЕЙМОС був розроблений інший, більш ефективний алгоритм. У загальному плані – це алгоритм мінімізації квадратичної функції на N -мірному кубі.

Даний алгоритм побудований на використанні специфіки опуклої множини, породжуваної умовами – обмеженнями. Теоретично даний алгоритм знаходить рішення за кінцеве число ітерацій. Ця його особливість підтверджується прикладами швидкої збіжності методу на практиці.

Використовуючи усе вищесказане, був розроблений алгоритм і реалізована функція побудови каркасної поверхні в системі ДЕЙМОС. Суть його полягає в створенні геометричної моделі поверхні по набору ліній. При цьому лінії, на які буде „натягнутися” поверхня, виступають у ролі каркасних – звідси і назва поверхні. Для побудови даного типу поверхні задаються каркасні лінії двох напрямків – поперечного й поздовжнього. При цьому дані лінії можуть бути як елементарними, так і складеними. Після заміни заданих ліній на сплайни і відсікання їх по граничних (перших і останніх $\bar{R}_{p0}, \bar{R}_{pM}, \bar{R}_{q0}, \bar{R}_{qN}$) лініях, формуються масиви точок перетинання ліній $\bar{R}_{mn}, \bar{R}_{p_{mn}}, \bar{R}_{q_{mn}}, \bar{R}_{pq_{mn}}$. Після перепараметризації всіх сплайнів у користувача запитуються граничні умови на крайках створюваної поверхні. За цими граничними умовами створюються сплайни нормалей на крайках і векторів похідних. Таким чином, каркасна поверхня являє собою масиви ліній двох напрямків, доповнені лініями на крайках, що

призначені для виконання граничних умов на крайках, забезпечуючи гладке стикування з іншими елементами складеної поверхні. Таким чином, математичний опис каркасної поверхні являє собою динамічний масив

$$\begin{aligned} & \bar{R}_{00}, \bar{R}_{p00}, \bar{R}_{q00}, \bar{R}_{pq00}, \bar{R}_{p01}, \bar{R}_{p02}, \dots, \bar{R}_{p0M}, \\ & \bar{R}_{q01}, \bar{R}_{q02}, \dots, \bar{R}_{q0N}, \\ & \bar{R}_{p00}, \\ & \dots \\ & \bar{R}_{q00}, \\ & \bar{R}_{p_{\min}}, \bar{R}_{p_{\max}}, \\ & \bar{R}_{q_{\min}}, \bar{R}_{q_{\max}}, \end{aligned}$$

де $\bar{R}_{pr}, \bar{R}_{qp}, \bar{R}_{pq}, \bar{R}_{pp}, \bar{R}_{qq}$ – оцінні константи для ітераційних процесів у визначенні мінімального кроку;

p_0, p_1, \dots, p_M – значення параметрів уздовж поперечного перерізу поверхні;

q_0, q_1, \dots, q_N – значення параметрів уздовж поздовжнього перетину поверхні;

– вузол $(0,0)$ поверхні, де

– значення координат точки з параметрами p_0, q_0 ;

– значення похідної по параметру p ;

– значення похідної по параметру q ;

– значення похідної по параметрах pq ;

– вузол $(0,1)$ поверхні;

– поверхні (m, n) ;

$p_{\min}, p_{\max}, q_{\min}, q_{\max}$ – значення

Проекти, розроблені за допомогою САПР ДЕЙМОС

№ з/п	№№ проектів	Призначення, тип судна	Головні розміри		
			L max(м)	B max(м)	H борта(м)
1	01601	Багатоцільове судно	110,0	11,45	3,7
2	01701	Контейнеровоз	110,0	11,45	3,56

Продовження таблиці

№ з/п	№№ проектів	Призначення, тип судна	Головні розміри		
			L max(м)	B max(м)	H борта(м)
3	01201	Універсальне судно для перевезення контейнерів, твер-дих та сипучих вантажів	106,65	15,0	8,314
4	ЛГ003	Контейнеровоз	110,0	11,45	3,75
5	ЛГ004	Хімовоз	111,0	11,75	3,85
6	201	Танкер	129,4	16,5	6,825
7	04411	Плавуча насосна станція	44,0	10,0	2,7
8	DRL960	Універсальне судно для річкового району плавання	84,96	9,56	3,25
9	9340	Універсальне судно для змішаного району плавання	88,64	12,5	6,56
10	0217	Сейнер	17,1	6,2	5,8
11	01203	Універсальне судно для перевезення контейнерів, твердих та сипучих вантажів	106,7	15,0	8,3
12	1485	Судно-постачальник	83,9	19,7	10,5
13	1910	Катер	20,2	4,5	3,0
14	552001	Буксир	60,4	13,5	7,0
15	1145К	Контейнеровоз	109,7	11,4	3,7
16	13302	Вартовий корабель	24,3	6,6	2,3
17	9300	Контейнеровоз	88,9	12,5	3,7
18	1145	Контейнеровоз	109,8	11,4	3,6
19	1145E	Контейнеровоз	110,0	11,4	3,7
20	9300L	Контейнеровоз	88,6	12,5	7,1
21	01400	Люкові закриття для фірми MACOR	28 кришок загальною вагою близько 900 т		
22	9352	Автомобілевоз	110,0	12,5	5,2
23	619	Контейнеровоз	118,6	15,2	9,85

Внаслідок того, що розроблене програмне забезпечення побудовано з використанням принципів об'єктної орієнтованості та на клієнт-серверній

моделі, воно може бути використане в інших САПР, де потрібно моделювання гладких та складних поверхонь (наприклад, у авіабудуванні).

Література

1. Шпур Г., Краузе Ф.-Л. Автоматизированное проектирование в машиностроении. – М.: Машиностроение, 1988. – 648 с.
 2. Шенен П. Математика и САПР. – М.: Мир, 1988. – Т. 1. – 234 с.
 3. Дубів І.І. Система деталювання й моделювання корпусу судна ДЕЙМОС: основні принципи та загальна структура // Зб. “Труди УДМТУ”. Вип. 43. – Миколаїв: УДМТУ, 2001. – С. 32-39.
 4. Система автоматизированного проектирования судов ДЕЙМОС. Методика построения составной поверхности. Руководство пользователя / А.П. Александров, Д.П. Быков, В.А. Кирпа и др. – Николаев: ОАО “НИИ Центр”, 2002. – 84 с.
 5. Информационные технологии в наукоемком машиностроении. Компьютерное обучение промышленного бизнеса / П.В. Балувев, В.А. Богуслав, Г.А. Кривов и др.; Под ред. А.Г. Братухина. – К.: Техніка, 2001. – 709 с.
 6. Бубнов А.А. САТІА 5 для судостроения – техническая подоплека вызова // CAD/CAM/CAE observer. – 2002. – № 2. – С. 48-49.
 7. Голованов В.С., Краснов Н.М., Краснов М.В. Применение системы Unigraphic для плазовой подготовки производства // CADmaster. – 2002. – № 5. – С. 12-17.
 8. Алберг Дж., Нильсон Э., Уолш Дж. Теория сплайнов и ее приложения. – М.: Мир, 1972. – 242 с.
 9. M.G. Cox. An algorithm for spline interpolation, J. Inst. Maths Applics 15, 1975. – С. 95-108.
 10. Лоран П.Ж. Аппроксимация и оптимизация. – М.: Мир, 1975. – 496 с.
 11. Васильев Ф.П. Численные методы решения экстремальных задач. – М.: Наука, 1980. – 520 с.
-

Стаття надійшла до редколегії 25.04.2004 р.