

К.М.Маханов, Ж.С.Нурланова, А.Б.Кенжалиева, А.А.Орақбай

Карагандинский государственный университет им. Е.А.Букетова
(E-mail: makanov@inbox.ru)

Возможности реализации адаптивного управления с применением технологии Mindstorms NXT

В статье рассмотрены разработки с использованием устройств, реализованных по технологии LEGO Mindstorms NXT. Конструктор состоит из ряда электромеханических систем и программируемого блока. Отмечено, что устройство может быть использовано как для научных, так и для образовательных целей, позволяет изучать и сравнивать различные алгоритмы идентификации и адаптивного управления. Представлены результаты апробации теоретических алгоритмов адаптивного управления для различных мобильных моделей, собранных из микрокомпьютера Mindstorms NXT.

Ключевые слова: микрокомпьютер, адаптивное управление, Mindstorms NXT, сервомотор, ультразвуковой датчик, LabVIEW, National Instruments.

Введение

Согласно выводам авторов работы [1], привлечение или вовлечение в образовательный процесс является одним из эффективных инструментов, который позволит повысить интерес к изучению таких курсов, как математика, физика и информатика. Для этого необходимы технологически совершенные образовательные ресурсы, наглядные пособия, стенды и новые элементы в методике преподавания. В этом смысле большой интерес представляют различные конструкторы, которые позволяют создавать автономные модели роботов и разнообразные обучающие стенды.

Во многих странах мира подобные конструкторы успешно используются при работе со школьниками и студентами [1, 2].

В последние годы большую популярность приобрёл конструктор LEGO® Mindstorms NXT датского производства. Оказалось, что с помощью микрокомпьютера Mindstorms NXT хорошо обучать школьников основам программирования [3–5], познавать законы физики, развивать аналитическое мышление, математическую логику и конструкторские способности. Большое количество различных датчиков, освоение принципов их действия способствуют пониманию физических явлений и закономерностей. В процессе сборки модели или устройства учащийся самопроизвольно «вынужден» дополнительно решать математические задачи, непосредственно связанные с расчетом таких параметров, как длительность перемещения, время отклика системы на команду, количество вращения вала серводвигателя и многое другое.

Впервые идею обучения программированию с помощью робота-черепашки (виртуального) высказал известный психолог С.Пейперт [6, 7]. Он обратил внимание на то, что детям важно сразу видеть результаты работы своей программы. Например, если при рисовании домика окно или дверь получаются вне дома, это сразу видно, и ребёнок, обучаемый программированию, сразу может приступить к поиску ошибки в своей программе.

Естественно, многие преподаватели вузов попытались использовать роботы LEGO® Mindstorms для обучения студентов и даже добились определённых успехов [8–10]. Как отмечают авторы, применение в образовательном процессе технологий LEGO® конструктор Mindstorms NXT позволило повысить в целом заинтересованность учащихся к таким дисциплинам, как физика, математика и информатика.

В данной работе на примере проведения конкретных разработок представлены результаты, полученные при работе с школьниками 9–10 классов г. Караганды. Следует отметить, что при выполнении данных работ некоторая часть теоретических положений была заимствована из работ [11–15]. Сами модели собраны самостоятельно учениками, а программы управления были реализованы совместно с авторами статьи.

Задача 1. Движение вдоль неизвестной траектории.

В качестве алгоритмов адаптивного управления возможно использование подходов, опубликованных в [13, 16–22].

Объектом управления является прототип робота с гусеничным приводом, собранный из конструктора Lego NXT. Сначала решается простая задача — слежение за подвижным объектом или целью. Объектом слежения может быть любой предмет, например, книга (рис. 1).

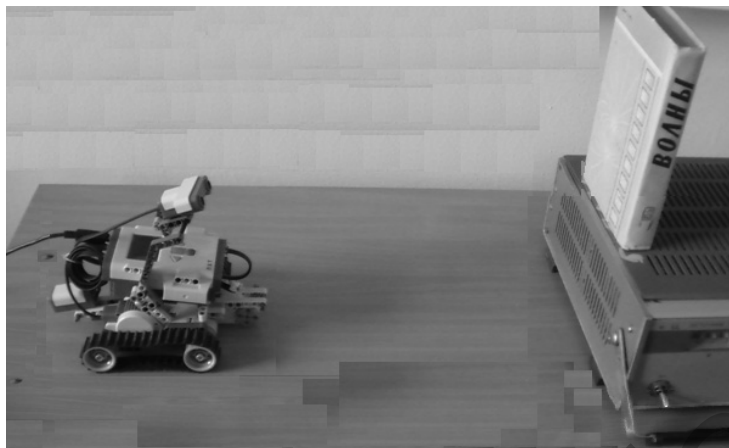


Рисунок 1. Удержание заданной дистанции

Для измерения и фиксации расстояния до преграды использовали ультразвуковой датчик. Алгоритм управления сравнивает текущее расстояние с заданным и на основе ошибки слежения $e(t)$ формирует сигнал управления на сервомоторы. Закон управления имеет вид

$$u_1 = u(t), u_2 = u(t), \quad (1)$$

где u_1 и u_2 — сигналы управления, подаваемые непосредственно на сервомоторы. Для расчета сигнала управления $u(t)$ был использован метод «последовательный компенсатор» [13, 22–24]:

$$u(t) = -k\alpha(p)\xi_1(t), \quad (2)$$

$$\begin{cases} \zeta_1 = \sigma\xi_2, \\ \zeta_2 = \sigma\xi_3, \\ \dots\dots\dots \\ \zeta_{p-1} = \sigma(-k_1\xi_1 - k_2\xi_2 - \dots - k_{p-1}\xi_{p-1} + -k_1e), \end{cases} \quad (3)$$

где число $k > 0$; $\alpha(p)$ — гурвицев полином степени $p-1$, где p — относительная степень выбираемой модели движения робота; число $\sigma > k$; коэффициенты k_i рассчитываются из требований асимптотической устойчивости системы (3) при нулевом входе. Настройка параметров k и σ осуществлялась за счет увеличения их значений до тех пор, пока не выполнялось условие [25]

$$|e(t)| < \delta_0 \text{ для } t \geq t_1, \quad (4)$$

где положительное число δ_0 задается разработчиком системы управления.

Для настройки параметра k использовался алгоритм

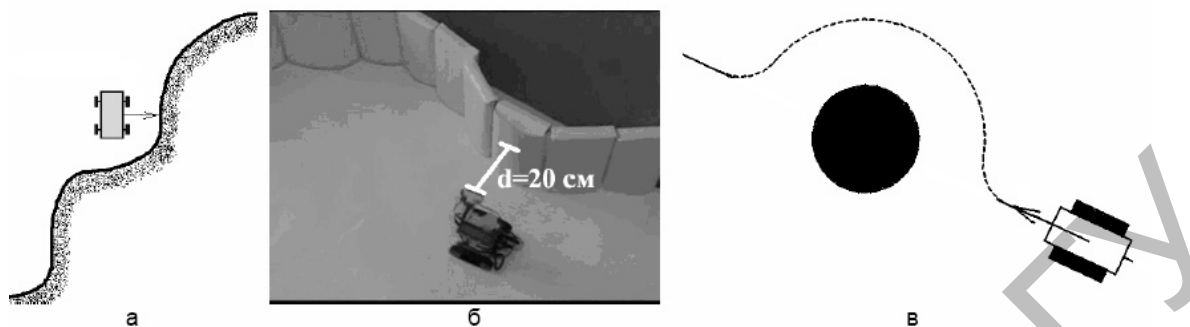
$$k(t) = \int_{t_0}^t \lambda(\tau) d\tau, \quad \sigma = \sigma_0 k^2, \quad \lambda(t) = \begin{cases} \lambda_0 & \text{при } |e(t)| > \delta_0; \\ 0 & \text{при } |e(t)| \leq \delta_0, \end{cases} \quad (5)$$

где числа $\lambda_0 > 0$ и $\sigma_0 > 0$. Далее рассматривалась задача адаптивного управления движением мобильного робота вдоль неизвестной траектории (рис. 2а, б). На базе конструктора Lego NXT собрана мобильная установка с гусеничным приводом, на которой зафиксирован ультразвуковой датчик расстояния, измеряющий дистанцию до стены, вдоль которой происходит движение. Кривизна стены заранее не определена. Робот, двигаясь в направлении стены, определяет расстояние до нее, сравнивает это значение с заданным и на основе траекторной ошибки формирует сигналы управления на приводы. Закон управления имеет вид

$$u_1 = u_v(t) + u(t), \quad u_2 = u_v(t) - u(t), \quad (6)$$

где u_1 и u_2 — сигналы управления, подаваемые непосредственно на сервоприводы; функция u_v выбирается пропорционально скорости, с которой макет будет двигаться на прямом участке траектории,

функция u вносит рассогласование между приводами, что обуславливает поворот робота влево или вправо. Для расчета сигнала управления $u(t)$ использовался алгоритм (2)–(5).



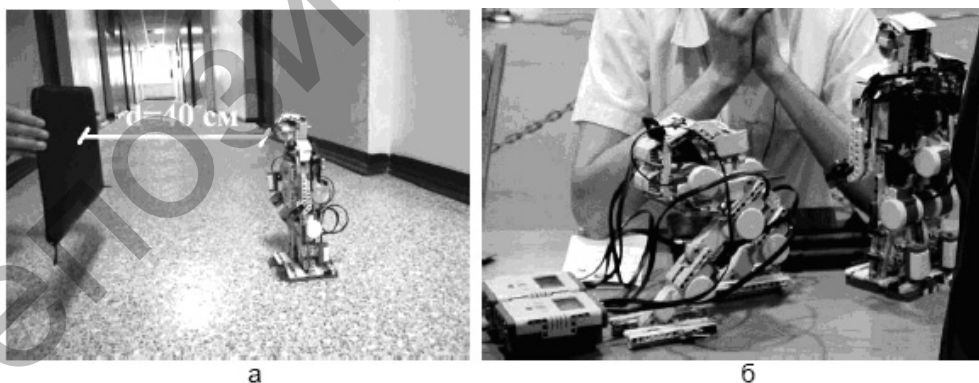
a — схема движения; b — практическая реализация;
 c — схема объезда препятствий и возврата на заданную траекторию

Рисунок 2. Движение робота вдоль неизвестной траектории

Усложняя задачу управления роботом, на пути его движения можно установить внешнее препятствие (рис. 2в). Робот двигается по заданной траектории и видит на своем пути препятствие. Подъехав к нему на некоторое расстояние, робот начинает объезжать препятствие, удерживая заданную дистанцию от него. По мере приближения к основной траектории робот начинает выкручивать на нее, оставляя позади препятствие. При движении по заданной траектории может быть использован алгоритм (2)–(6) при условии, что доступна измерению траекторная ошибка $e(t)$. Этот же подход используется для построения алгоритма объезда препятствия на заданном расстоянии.

Задача 2. Адаптивное управление двуногим шагающим роботом.

На данном этапе исследуются методы адаптивного управления для двуножного шагающего робота (рис. 3). На рисунке 3а представлен эксперимент по управлению шагающим роботом при решении задачи слежения за целью на заданном расстоянии. В данной задаче, в отличие от предыдущей, робот имеет более сложную конструкцию. Необходимо заставить робот ходить вперед и назад. Далее, как и в предыдущей работе, решаются задачи управления движением робота относительно неизвестных траекторий.



a — удержание заданной дистанции шагающим роботом;
 b — роботизированные ноги с тремя степенями свободы

Рисунок 3. Двуногие шагающие роботы

На рисунке 3б показан эскизный образец двуножного шагающего робота, ноги которого имеют три управляемые степени свободы, по аналогии с обычной ногой, у которой есть коленный и голеностопный суставы. Модель может запоминать движения, которые ей показывают на стадии «обучения», а затем воспроизводить их. Учащимся предлагались следующие задачи: слежение за объектом, перемещение вдоль неизвестной траектории и ходьба с обходом препятствий на заданном расстоянии.

В заключение надо отметить, что среда программирования для микроконтроллера Mindstorms NXT был разработан LEGO® совместно с компанией National Instruments (NI), которая является одним из лидеров в сфере предоставления программных продуктов для сбора, анализа и обработки информации. Основным программный пакет, предлагаемый NI, — среда графического программирования LabVIEW, разработанная для выполнения прикладных программ инженерного направления. Основным отличием от существующих текстовых языков программирования (C, C++, PASCAL, BASIC) является то, что LabVIEW использует графический язык программирования G (Graphics), предназначенный для создания программ в форме структурных схем. Рассматриваемый в работе конструктор Mindstorms NXT может быть запрограммирован с применением пакета LabVIEW. Такие работы совместно со школьниками (более старшего возраста) нами уже ведутся. В частности, разработана программа, которая позволяет обрабатывать и выводить на экран монитора видеоизображение, получаемое от видеокамеры, установленной на движущийся прототип колесного робота, так называемый «оптический глаз». Однако данная программа и в целом система «компьютер – микроконтроллер Mindstorms NXT – видеокамера» требуют доработки, в связи с чем полученные результаты не были включены в данный материал.

Заключение

Анализ литературных данных показал, что за последние 5–6 лет значительно вырос интерес к возможностям конструктора Mindstorms NXT. Увеличилось количество публикаций, учебно-методической литературы и книг посвященных технологии NXT. Ежегодно проводятся региональные (в России, Украине, Корея, Япония) и международные конкурсы машин и моделей построенных именно по данной технологии. В ряде стран ближнего зарубежья стремительно выросло количество учебных центров и кружков, ориентированных на работу со школьниками и студентами. Все это свидетельствует о популярности конструктора Mindstorms NXT. Однако на данный момент в Казахстане нет специализированных кружков, ориентированных на работу по технологии Mindstorms NXT.

Опыт работы со школьниками показал, что применение новых образовательных технологий стимулирует их познавательную активность, прививает навыки конструкторского мастерства, повышает уровень знаний в физике, математике и информатике. Главное, способствует пробуждению интереса к инженерным и точным наукам.

Список литературы

- 1 *Papert S.* The Children's Machine: Rethinking School in the Age of the Computer, 1992.
- 2 *Филиппов С.А.* Робототехника для детей и родителей. — СПб.: Наука, 2010.
- 3 LEGO Technic Tora no Maki, ISOGAWA Yoshihito, Version 1.00 Isogawa Studio, Inc., 2007 // [ЭП]. Режим доступа: <http://www.isogawastudio.co.jp/legostudio/toranomaki/en/>.
- 4 CONSTRUCTOPEDIA NXT Kit 9797, Beta Version 2.1, 2008. Center for Engineering Educational Outreach, Tufts University // [ЭП]. Режим доступа: http://www.legoengineering.com/library/doc_download/150-nxt-constructopedia-beta-21.html.
- 5 Lego Mindstorms // Wikipedia, the free encyclopedia: [ЭП]. Режим доступа: http://en.wikipedia.org/wiki/Lego_Mindstorms.
- 6 *Papert S.* Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas. — Basic Books, 1980.
- 7 *Пе́йне́рт С.* Переворот в сознании: Дети, компьютеры и плодотворные идеи. — М.: Педагогика, 1989.
- 8 *Valera A., Valles M., Fernandez A., Albertos P.* Platform for the development of mechatronic practical works based on LEGO Mindstorms NXT robots // Control Applications & Intelligent Control, IEEE, 2009. — P. 1224–1229.
- 9 *Benedettelli D., Casini M., Garulli A., Giannitrapani A., Vicino A.* A LEGO Mindstorms experimental setup for multi-agent systems // Proc. IEEE Conf. Control Applications & Intelligent Control, IEEE, 2009. — P. 1230–1235.
- 10 Lehrstuhl für Bildverarbeitung. MATLAB Meets LEGO Mindstorms // [ЭП]. Режим доступа: <http://www.mindstorms.rwth-aachen.de>.
- 11 *Pyrkin A., Bobtsov A., Kremlev A.* Rejection of Unknown Biased Harmonic Disturbance for Nonlinear System with Input Delay // Time Delay System Conference. — Prague, Czech Republic, 2010.
- 12 *Pyrkin A., Bobtsov A., Chepinskiy S., Kapitanyuk Y.* Compensation of Unknown Multiharmonic Disturbance for Nonlinear Plant with Delay in Control // 8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems. — Bologna, Italy, 2010.
- 13 *Bobtsov A.A.* A note to output feedback adaptive control for uncertain system with static nonlinearity // Automatica. — 2005. — No. 12. — P. 1277–1280.
- 14 *Bobtsov A., Kolyubin S., Pyrkin A.* Adaptive stabilization of reaction wheel pendulum on moving LEGO platform // 3rd IEEE Multi-conference on Systems and Control (MSC 2009). — Saint Petersburg, Russia, 2009.

- 15 Bobtsov A., Kolyubin S., Pyrkin A. Stabilization of Reaction Wheel Pendulum on Movable Support with On-line Identification of Unknown Parameters // Physics and Control (Physcon 2009): 4th International Conference. — Catania, Italy, 2009.
- 16 Astrom K.J., Block D.J., Spong M.W. The Reaction Wheel Pendulum, 2001.
- 17 Fradkov A.L., Miroshnik I.V., Nikiforov V.O. Nonlinear and adaptive control of complex systems. — Kluwer Academic Publishers. Dordrecht, 1999. — 528 p.
- 18 Krstic M., Kanellakopoulos L., Kokotovich P.V. Nonlinear and adaptive control design. — Wiley New York, 1995.
- 19 Monopoli R.V. Model reference adaptive control with an augmented signal // IEEE Trans. on Automatic Control. — 1974. — Vol. 19, No. 5.
- 20 Narendra K.S., Valavani L.S. Stable adaptive controller design — direct control // IEEE Trans. on Automatic Control. — 1978. — Vol. 23, No. 4.
- 21 Aranovskiy S., Bobtsov A., Kremlev A., Nikolaev N., Slita O. Identification of frequency of biased harmonic signal // European Journal of Control. — 2010. — No. 2. — P. 129–139.
- 22 Bobtsov A.A. Discussion on: «Positive Real Control for Uncertain Singular Time-delay Systems via Output Feedback Controllers» // European Journal of Control. — 2004. — No. 4. — P. 305–306.
- 23 Бобцов А.А., Николаев Н.А. Последовательный компенсатор в задаче управления однозвенным роботом-манипулятором с гибкими связями // Мехатроника, автоматизация, управление. — 2006. — № 8. — С. 2–7.
- 24 Бобцов А.А., Николаев Н.А. Управление по выходу линейными системами с неучтенной паразитной динамикой // Автоматика и телемеханика. — 2009. — № 6. — С. 115–122.
- 25 Bobtsov A., Pyrkin A. Experimental research of consecutive compensator approach on basis of mechatronic systems // 6th EUROMECH Conference ENOC. — St. Petersburg, 2008.

Қ.М.Маханов, Ж.С.Нұрланова, А.Б.Кенжалиева, А.Ә.Орақбай

Mindstorms NXT технологияларын қолдану арқылы адаптивті басқару мүмкіндіктерін жүзеге асыру

Мақалада Lego Mindstorms NXT технологиясын қолдану арқылы құрастырылған өнімдер келтірілген. Конструктордың құрамында бірқатар электр-механикалық жүйелер және программаланатын блок бар. Құрал ғылыми және білім беру мақсаттарында қолданыс таба алады. Әр түрлі идентификациялау алгоритмдерін және адаптивті басқаруды зерттеп, өзара салыстыру мүмкіндігін қамтиды. Mindstorms NXT микрокомпьютерін қолдану арқылы құрастырылған әр түрлі ұтқыр модельдерді адаптивті басқарудың теориялық алгоритмдерін алғашқы рет тексеру нәтижелері келтірілген.

К.М.Мakhanov, Zh.S.Nurlanova, A.B.Kenzhaliyeva, A.A.Orakbay

Use technology LEGO Mindstorms NXT for adaptive management introduction

This paper presents the design using devices implemented technology LEGO Mindstorms NXT. Designer is composed of several electromechanical systems and programmable unit. The device can be used both for research and for educational purposes. Allows us to study and compare different algorithms identification and adaptive control. The results of testing the theoretical adaptive control algorithms for different mobile models assembled from the microcomputer Mindstorms NXT.

References

- 1 Papert S. *The Children's Machine: Rethinking School in the Age of the Computer*, 1992.
- 2 Filippov S.A. *Robotics for kids and parents: Textbook for Universities*, Ed. by Dr. of techn. Prof. A.L.Fradkov, St. Petersburg: Nauka, 2010, p. 88.
- 3 *LEGO Technic Tora no Maki*, ISOGAWA Yoshihito, Version 1.00 Isogawa Studio, Inc., 2007, URL: <http://www.isogawa-studio.co.jp/legostudio/toranomaki/en/>.
- 4 *CONSTRUCTOPEDIA NXT Kit 9797*, Beta Version 2.1, 2008, Center for Engineering Educational Outreach, Tufts University, URL: http://www.legoengineering.com/library/doc_download/150-nxt-constructopedia-beta-21.html.
- 5 *Lego Mindstorms*, Wikipedia, the free encyclopedia, URL: http://en.wikipedia.org/wiki/Lego_Mind_storms.
- 6 Papert S. *Mindstorms: Children, Computers, and Powerful Ideas*, Basic Books, 1980.
- 7 Papert S. *Revolution in consciousness: Children, Computers and fruitful ideas*: Monograph, Moscow: Pedagogika, 1989, 356 p.
- 8 Valera A., Valles M., Fernandez A., Albertos P. *Control Applications & Intelligent Control*, IEEE, 2009, p. 1224–1229.

- 9 Benedettelli D., Casini M., Garulli A., Giannitrapani A., Vicino A. *Proc. IEEE Conf. Control Applications, & Intelligent Control, IEEE*, 2009, p. 1230–1235.
- 10 *Lehrstuhl für Bildverarbeitung. MATLAB Meets LEGO Mindstorms*, URL: <http://www.mindstorms.rwth-aachen.de>
- 11 Pyrkín A., Bobtsov A., Kremlev A. *Time Delay System Conference*, Prague, Czech Republic, 2010.
- 12 Pyrkín A., Bobtsov A., Chepinskiy S., Kapitanyuk Y. *8th IFAC Symposium on Nonlinear Control Systems*, Bologna, Italy, 2010.
- 13 Bobtsov A.A. *Automatica*, 2005, 12, p. 1277–1280.
- 14 Bobtsov A., Kolyubin S., Pyrkín A. *3rd IEEE Multi-conference on Systems and Control (MSC 2009)*, St. Petersburg, Russia, 2009.
- 15 Bobtsov A., Kolyubin S., Pyrkín A. *Physics and Control (Physcon 2009): 4th International Conference*, Catania, Italy, 2009.
- 16 Astrom K.J., Block D.J., Spong M.W. *The Reaction Wheel Pendulum*, 2001.
- 17 Fradkov A.L., Miroshnik I.V., Nikiforov V.O. *Nonlinear and adaptive control of complex systems*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1999, 528 p.
- 18 Krstic M., Kanellakopoulos L., Kokotovich P.V. *Nonlinear and adaptive control design*, Wiley New York, 1995.
- 19 Monopoli R.V. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1974, 19(5).
- 20 Narendra K.S., Valavani L.S. *IEEE Trans. on Automatic Control*, 1978, 23(4).
- 21 Aranovskiy S., Bobtsov A., Kremlev A., Nikolaev N., Slita O. *European Journal of Control*, 2010, 2, p. 129–139.
- 22 Bobtsov A.A. *European Journal of Control*, 2004, 4, p. 305–306.
- 23 Bobtsov A.A., Nikolaev N.A. *Mechatronics, Automation, Control*, 2006, 8, p. 2–7.
- 24 Bobtsov A.A., Nikolaev N.A. *Automation and Remote Control*, 2009, 6, p. 115–122.
- 25 Bobtsov A., Pyrkín A. *6th EUROMECH Conference ENOC*, St. Petersburg, Russia, 2008.

Сведения об авторах

Маханов К.М. — канд. физ.-мат. наук, доцент, Карагандинский государственный университет имени академика Е.А.Букетова.

Нурланова Ж.С. — магистрант, Карагандинский государственный университет имени академика Е.А.Букетова.

Кенжалиева А.Б. — магистрант, Карагандинский государственный университет имени академика Е.А.Букетова.

Оракбай А.А. — магистрант, Карагандинский государственный университет имени академика Е.А.Букетова.

Information about authors

Makhanov K.M. — Candidate of physical and mathematical sciences, Docent, Academician Ye.A.Buketov Karaganda State University.

Nurlanova Zh.S. — Undergraduate, Academician Ye.A.Buketov Karaganda State University.

Kenzhaliyeva A.B. — Undergraduate, Academician Ye.A.Buketov Karaganda State University.

Orakbay A.A. — Undergraduate, Academician Ye.A.Buketov Karaganda State University.